

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний факультет
(повне найменування факультету)
Кафедра «Технологія машинобудування»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)
другий (магістерський)
(ступінь вищої освіти)

на тему «Дослідження впливу варіювання швидкістю різання на коливання при
кінцевому фрезеруванні»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М-112м
Спеціальності 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Технології машинобудування»

ЗУБАРЄВ А.Є.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ДЯДЯ С. І.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент МАТЮХІН А.Ю.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Запоріжжя, 2023

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

Факультет Машинобудівний
Кафедра Технологія машинобудування
Ступінь вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Технології машинобудування»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ

«__» _____ 2023 року

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

ЗУБАРЄВА Андрія Євгеновича
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Дослідження впливу варіювання швидкістю різання на коливання при кінцевому фрезеруванні»

керівник проекту (роботи) канд. техн. наук, доцент ДЯДЯ Сергій Іванович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14»11 2023 року №436

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 11.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) технічні вимоги щодо якості поверхні після кінцевого фрезерування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити)

1 Аналіз літературних джерел. 2 Розробка програм для фрезерних верстатів з варіюванням швидкістю обертання шпинделя. 3. Методичне забезпечення проведення експериментів. 4 Дослідження впливу варіювання швидкістю обертання шпинделя на продуктивність та шорсткість обробленої поверхні. 5. Аналіз отриманих результатів. 6. Економічна частина. 7. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання « 23 » вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	1 Огляд науково-технічної літератури та патентної інформації з використання при кінцевому фрезеруванні варіювання швидкістю шпинделя	23.10.2023 - 31.10.2023	
2	Розробка математичних моделей керування фактичною швидкістю різання	01.11.2023 - 06.11.2023	
3	Розробка програмного коду для верстатів із ЧПУ зі стійкою Siemens Sinumerik 840 D	07.11.2023 - 12.11.2023	
4	Методичне забезпечення проведення експериментів	13.11.2023 - 16.11.2023	
5	Дослідження впливу варіювання швидкістю обертання шпинделя на продуктивність та шорсткість обробленої поверхні	17.11.2023 - 19.11.2023	
6	Оцінка економічної ефективності технічних рішень	20.11.2023 - 24.11.2023	
7	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	25.11.2023 - 30.11.2023	
8	Висновки	01.12.2023 - 03.12.2023	
9	Оформлення пояснювальної записки	04.12.2023 - 06.12.2023	
10	Нормоконтроль, рецензія, перевірка на плагіат	07.12.2023 - 09.12.2023	
11	Захист магістерської роботи	12.12.2023 - 25.12.2023	

Студент(ка)

(підпис)

Андрій ЗУБАРСВ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Сергій ДЯДЯ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 106с., 58 рис., 7 табл., 11 додатків., 58 джерела.

ВАРІЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ РІЗАННЯ, ФРЕЗЕРУВАННЯ, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ УПРАВЛІННЯ, SIEMENS SINUMERIC

Об'єкт дослідження – процес фрезерування кінцевими фрезами.

Мета роботи – дослідження впливу варіювання швидкістю обертання шпинделя на інтенсивність коливань при кінцевому фрезеруванні.

Метод дослідження – експериментально - аналітичний.

Огляд літературних джерел з використання варіювання швидкістю різання при лезовій обробці показав його ефективність. Для визначення можливості впровадження цієї технології на верстатах з ЧПК зі стійкою Sinumerik 840 D були визначені амплітудно – частотні характеристики приводів головного руху. Їх аналіз показав спроможність фрезерувати на цих верстатах з модульованою швидкістю різання. Попередньо були визначені види коливань, які треба пригнічувати при кінцевому фрезеруванні. Дослідження показали, що через обмеження часу різання при цьому діють тільки супроводжуючі вільні коливання, які накладаються на вимушені та визначають якість обробленої поверхні і стійкість інструменту. Для налаштування автоколивань не вистачає часу різання. Отримані результати після кінцевого фрезерування з зустрічною та попутною подачею показали, що при використанні варіювання швидкістю різання шорсткість обробленої поверхні зменшується більш ніж на 20%, амплітуда коливань зменшується більш ніж на 50%. Все це підвищує стійкість інструменту і впливає на економічну ефективність процесу обробки. Крім цього для роботи на обладнанні в досліджувальній лабораторії були визначені заходи безпеки.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	8
Вступ	9
1 Огляд науково-технічної літератури та патентної інформації з використання при кінцевому фрезеруванні варіювання швидкістю шпинделя	10
2 Розробка математичних моделей керування фактичною швидкістю різання	20
2.1 Синусоїдальне варіювання	21
2.2 Синусоїдальне амплітудне варіювання	22
2.3 Синусоїдальне частотне варіювання	22
2.4 Синусоїдальне амплітудно-частотне варіювання	23
2.5 Синусоїдальне асиметричне варіювання	23
2.6 Стохастичне амплітудне варіювання	24
2.7 Стохастичне частотне варіювання	25
2.8 Стохастичне амплітудно-частотне варіювання	27
3 Розробка програмного коду для верстатів із ЧПУ зі стійкою Siemens Sinumerik 840 D	28
3.1 Синусоїдальне варіювання	28
3.2 Синусоїдальне амплітудне варіювання	28
3.3 Синусоїдальне частотне варіювання	30
3.4 Синусоїдальне амплітудно-частотне варіювання	30
3.5 Синусоїдальне асиметричне варіювання	31
3.6 Стохастичне амплітудне варіювання	32
3.7 Стохастичне частотне варіювання	32
3.8 Стохастичне амплітудно-частотне варіювання	34
4 Методичне забезпечення проведення експериментів	34

5 Дослідження впливу варіювання швидкістю обертання шпинделя на продуктивність та шорсткість обробленої поверхні	39
5.1 Визначення закономірності виникнення видів коливань при лезовій обробці	39
5.2 Визначення видів коливань при кінцевому фрезеруванні	43
5.3 Визначення швидкісних зон коливань при кінцевому фрезеруванні	46
5.4 Оцінка зон коливань при кінцевому фрезеруванні деталей із титанових сплавів	49
5.5 Експериментальне дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні без варіювання та з варіюванням швидкістю різання	52
5.5.1 Фрезерування однозубою фрезою	52
5.5.2 Фрезерування чотирьохзубою фрезою	60
6 Оцінка економічної ефективності технічних рішень	74
7 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	76
Висновки	81
Перелік джерел посилання	83
Додаток А Програмний код реалізації синусоїдального варіювання	89
Додаток Б Програмний код реалізації синусоїдального амплітудного варіювання	90
Додаток В Програмний код реалізації синусоїдального частотного варіювання	91
Додаток Г Програмний код реалізації синусоїдального амплітудно-частотного варіювання	92
Додаток Д Програмний код реалізації синусоїдального асиметричного варіювання	94

Додаток Е Програмний код реалізації стохастичного амплітудного варіювання	96
Додаток Ж Програмний код реалізації стохастичного частотного варіювання	98
Додаток К Програмний код реалізації стохастичного амплітудно-частотного варіювання	100
Додаток Л Відхилення першої хвилі супроводжуваних вільних коливань від ППР при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 1200 об/хв без варіювання швидкістю різання	102
Додаток М Відхилення першої хвилі супроводжуваних вільних коливань від ППР при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 1200 об/хв з варіюванням швидкістю різання з частотою 3Гц та амплітудою 20%	104
Додаток Н Відхилення останньої хвилі супроводжуваних вільних коливань від ППР при попутному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 1200 об/хв без варіюванням швидкістю різання	106

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ТС	– технологічна система
ЧПУ	– числове програмне управління
CSSV	Continuous spindle speed variation – безперервне варіювання швидкістю обертання шпинделя
DSST	Discrete spindle speed tuning – способи адаптивного управління, або підлаштування, швидкістю обертання шпинделя з метою зниження амплітуди вібрацій
RVA	The ratio of speed variation amplitude to the nominal speed – співвідношення амплітуди варіювання до номінального значення частоти обертання шпинделя
RVF	The ratio of speed variation frequency to the nominal speed – співвідношення частоти варіювання до номінального значення частоти обертання шпинделя
ГТД	- газотурбінний двигун
АЦП	- аналогово- цифровий перетворювач
ПС	- пружна система
ПЗ	- програмне забезпечення
ПК	- персональний комп'ютер
ЧВК	- частота вільних коливань
ППР	- положення пружної рівноваги
ВС	- визначальне співвідношення

ВСТУП

Підвищення продуктивності технологічних процесів на підприємствах авіакосмічної галузі є актуальним завданням. Цього можна досягти шляхом інтенсифікації режимів різання. Однією з перешкод, що стримують застосування інтенсивних режимів різання є втрата динамічної сталості технологічної системи (ТС). Вібрації великої амплітуди, що виникають при механічній обробці матеріалів, крім обмеження продуктивності різко знижують стійкість інструменту, термін служби обладнання, точність і якість оброблених поверхонь і можуть призводити до аварійних ситуацій внаслідок поломки найменш міцних елементів ТС.

Одним із ефективних технологічних прийомів у боротьбі з вібраціями при механічній обробці є руйнування джерела збудження автоколивань – регенеративного механізму. Регенеративний механізм є окремим випадком загальної здатності динамічних систем до самоорганізації своїх рухів (у разі коливань) з мінімальною витратою енергії. Руйнувати самоорганізацію можливо управлінням законом руху швидкості інструменту.

Найбільш раціональним для цього є використання вбудованих можливостей стійок ЧПК шляхом написання відповідного програмного коду. Такий підхід дозволяє впровадити обробку із варіацією швидкістю різання з мінімальними для виробництва витратами та термінами впровадження.

1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПАТЕНТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ВАРІЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ШПИНДЕЛЯ

Варіювання швидкістю обертання шпинделя, як засіб боротьби з вібраціями, що виникають при обробці різанням, було запропоновано в 70-х роках минулого століття японськими дослідниками Hoshi T. і Sato M. [1], Inamura T, Sata T. [2], [3], Takemura T., Kitamura T. [4], а також дослідниками з інших країн Jemielniak K., Widota A. [5], Sexton J.S., Stone B.J. [6], [7]. Варіювання швидкістю головного руху призводить до того, що запізнення між зовнішньою та внутрішньою хвилями на поверхні різання стає непостійним, що у свою чергу може підвищити вібростійкість. У англomовній літературі варіювання швидкістю головного руху позначається скорочено CSSV (Continuous spindle speed variation – безперервне варіювання швидкістю обертання шпинделя). Також до методів варіювання швидкістю обертання шпинделя в англomовних джерелах відносять DSST (Discrete spindle speed tuning), що означає способи адаптивного керування або підстроювання швидкості обертання шпинделя з метою зниження амплітуди вібрацій. У вітчизняній літературі DSST не належать до методів варіювання швидкістю обертання шпинделя.

Сильною стороною CSSV на відміну від інструментів зі змінною геометрією (крок зубів або кут нахилу ріжучої кромки) є можливість легко змінювати параметри налаштування. Ефективність цієї методики була продемонстрована в дослідженнях [8], [9], [10] (рис.1.1). Цей спосіб заснований на внесенні збуджень у команди управління швидкістю обертання шпинделя.

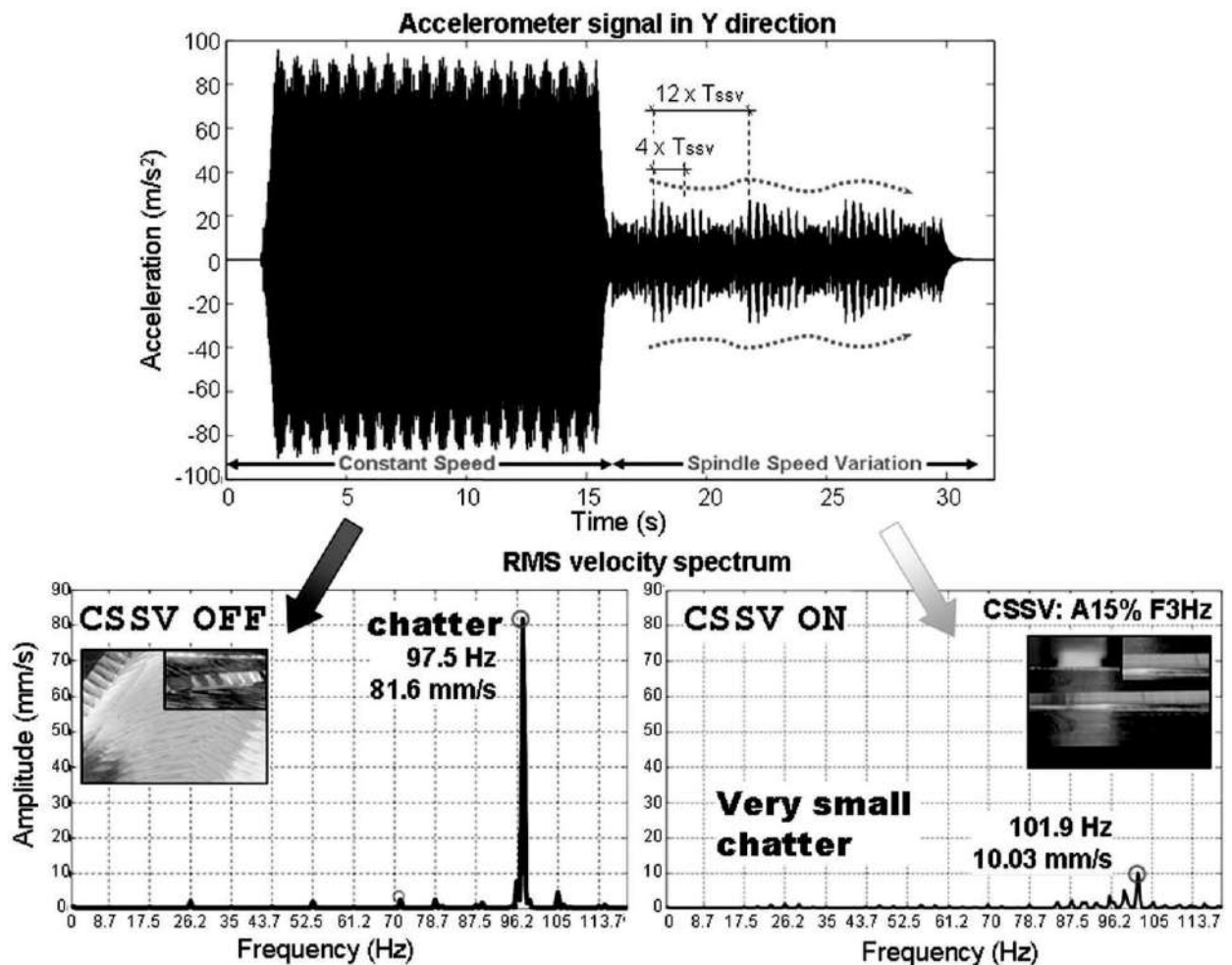


Рисунок 1.1 – Вплив синусоїдального варіювання на амплітуду коливань при торцевому фрезеруванні (амплітуда варіювання 15%, частота 3Гц [10])

Існують різні способи варіювання швидкістю обертання шпинделя:

- варіювання за синусоїдальним законом (рис. 1.2) [10], [11], [12];
- варіювання за пилкоподібним законом (рис. 1.3) [13];
- варіювання за прямокутним законом [7];
- варіювання за стохастичним законом (рис. 1.4) [14];
- варіювання шляхом періодичного лінійного переривання [15]

Синусоїдальне варіювання вважається найбільш ефективним способом зміни швидкості різання порівняно зі стохастичним, пилкоподібним або

прямокутним. У той же час синусоїдальний варіювання найбільш широко досліджено в порівнянні з іншими методами зміни швидкості різання.

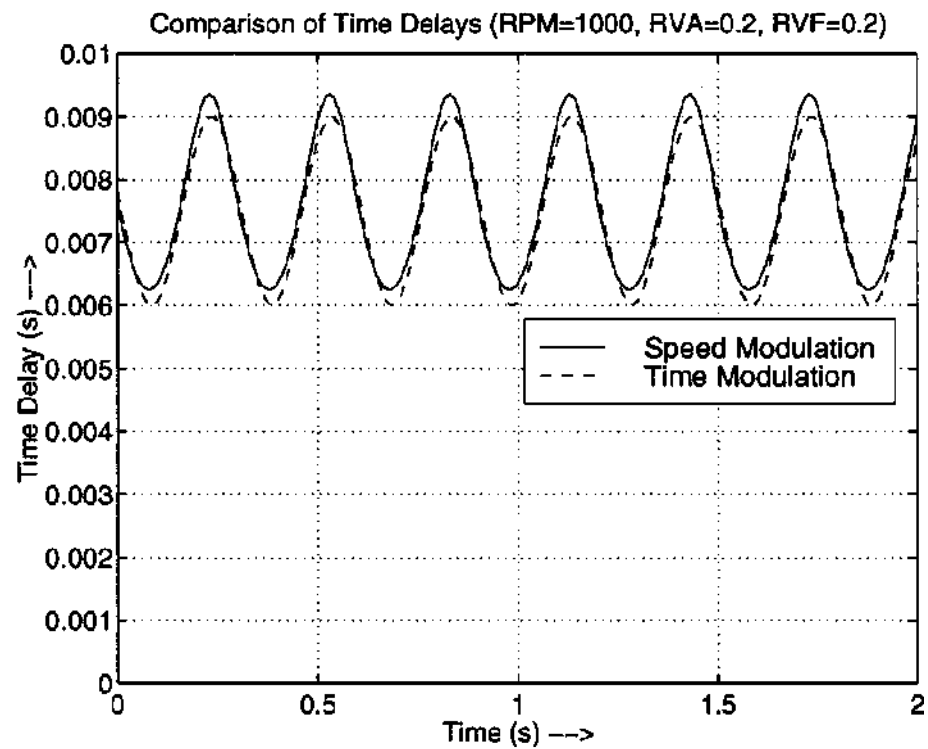


Рисунок 1.2 – Зміна швидкості різання за синусоїдальним законом [12]

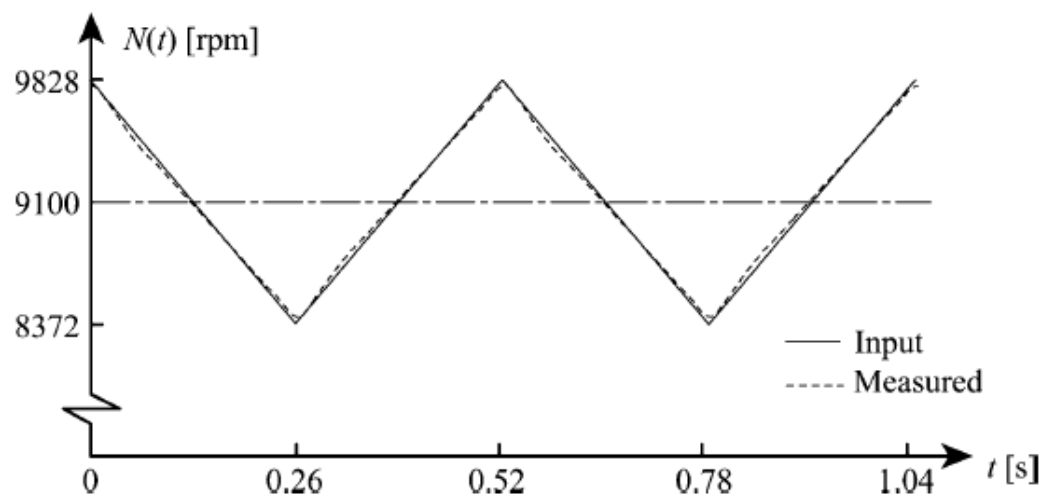


Рисунок 1.3 – Зміна швидкості різання за пилоподібним законом [13]

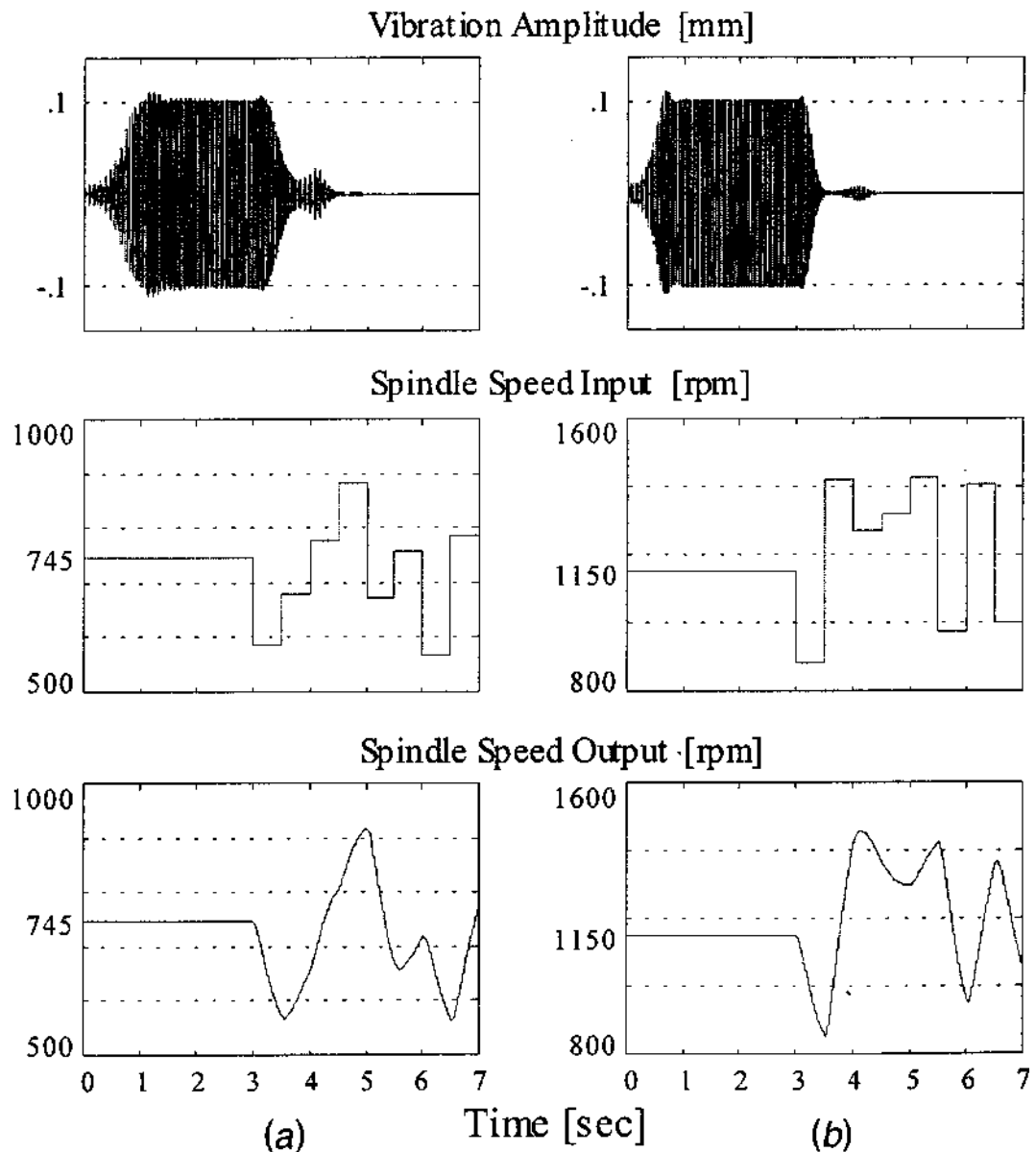


Рисунок 1.4 – Зміна швидкості різання за стохастичним законом [14]

Параметрами синусоїдального варіювання є амплітуда та частота (рис. 1.5), які задаються попередньо. Ці параметри обмежуються параметрами стійки ЧПУ та динамікою шпинделя [16]. Приклад кривої, що обмежує можливості динаміки шпинделя проводити синусоїдальне варіювання, показаний на рис. 1.6. Варіювання не повинно радикально знижувати ресурс деталей шпиндельного вузла.

На рис.1.5 прийняті такі позначення:

- RVA (the ratio of speed variation amplitude to the nominal speed) – співвідношення амплітуди варіювання до номінального значення частоти обертання шпинделя;
- RVF (the ratio of speed variation frequency to the nominal speed) – співвідношення частоти варіювання до номінального значення частоти обертання шпинделя;
- N – номінальна частота обертання шпинделя.

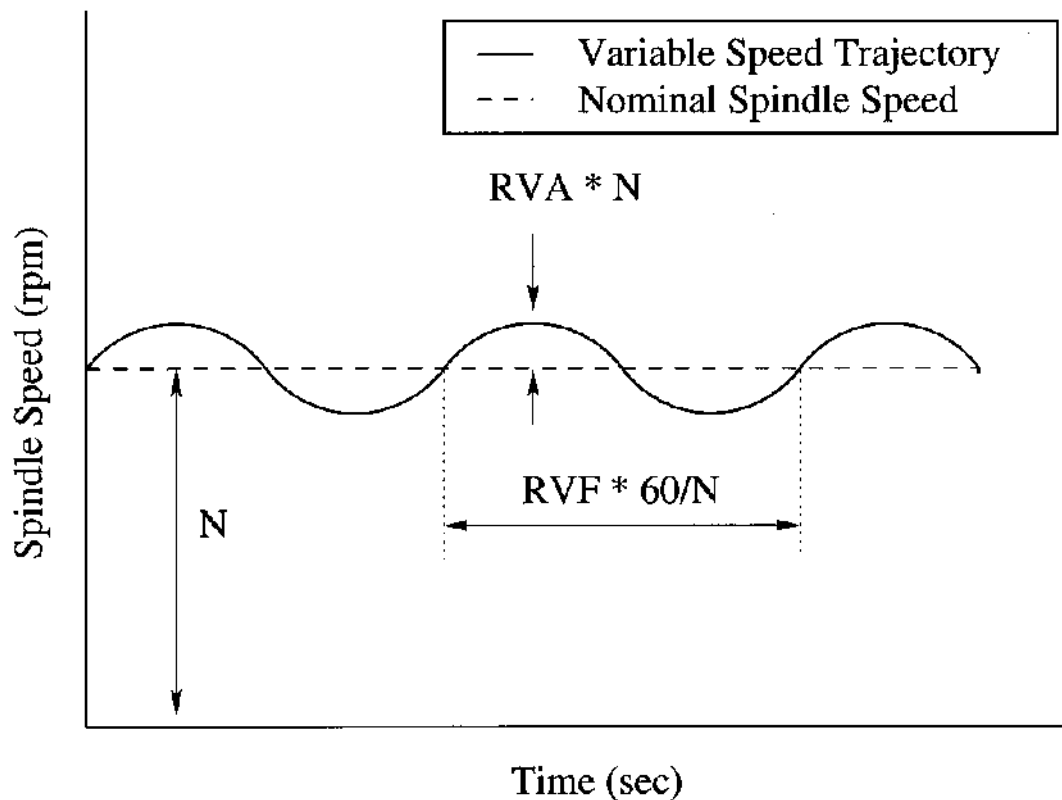


Рисунок 1.5 – Параметри синусоїдальної модуляції [9]

Визначення оптимальної амплітуди та частоти варіювання є складним завданням. Al Regib [11] запропонував просту формулу для визначення амплітуди та частоти варіювання, які залежать від частоти регенеративних автоколивань та частоти обертання шпинделя.

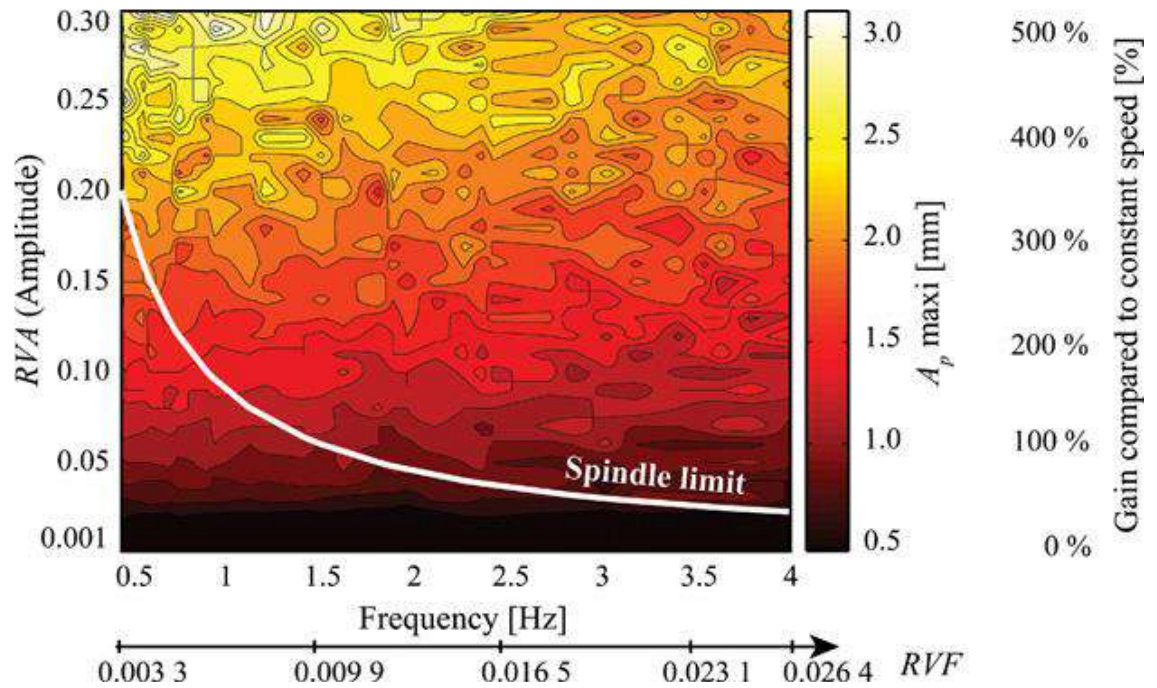


Рисунок 1.6 – Вплив синусоїдального закону зміни швидкості різання на вібростійкість процесу фрезерування при $N_0 = 9100$ об/хв $a_e = 2$ мм (біла лінія)

Відповідно до роботи [11] оптимальні амплітуда та частота варіювання можуть бути розраховані за такими формулами

$$\alpha_{opt} \approx \frac{\varepsilon_m}{2\pi N_m}, \quad (1.1)$$

$$f_s = \frac{z \cdot S_m}{120\pi} \sin^{-1} \left(\frac{60\omega_c}{\alpha_{opt} z S_m (\pi + 2\pi N_m)} - \frac{1}{\alpha_{opt}} \right), \quad (1.2)$$

де ε_m – фазовий зсув хвиль регенеративних коливань $\varepsilon_m + 2\pi N_m = 60\omega_c / z S_m$;

N_m – номер пелюстка на діаграмі стійкості;

z – число зубів фрези;

S_m – номінальне значення частоти обертання фрези;

ω_c – кругова частота регенеративних коливань.

У той же час, більшість авторів роблять складне імітаційне моделювання для визначення оптимальних значень частоти та амплітуди варіювання або проводять для цього експериментальні дослідження.

Моделювання вібростійкості з швидкістю різання, що змінюється, має ряд труднощів, пов'язаних з тим, що зміна швидкості перетворює частотні складові регенеративних автоколивань в нескінченну кількість частотних складових з бічними смугами на змінюваних частотах [2].

Inamura і Sata [2] вивели просту функцію для дослідження вібростійкості різання зі змінною швидкістю. Проте вони виявили, що прогнозоване моделлю збільшення вібростійкості не підтверджується в ході експериментальних досліджень. Sexton і Stone [7] визначили, що в результаті використання зміни швидкості обертання шпинделя досить незначні, що суперечить їх раннім результатам, в яких стверджувалося, що варіювання дає суттєве поліпшення.

Оптимізація варіювання для фрезерування може бути виконана за допомогою:

- моделювання в області часу [17];
- багаточастотними методами (рис. 1.7) [12], [16];
- моделювання в області часу методами напівдискретизації (рис.1.8) [18], [16].

З діаграм (рис. 1.9 и рис. 1.10) видно, що вплив амплітуди варіювання більш суттєве, ніж вплив її частоти [12].

Позитивний ефект зміни швидкості різання обмежується областю порівняно невеликих частот обертання шпинделя (зона А і В на рис. 1.11). У цих випадках невелика варіація швидкості обертання шпинделя може створювати досить велику зміну у фазах між сусідніми хвилями на поверхні різання. Тому амплітуда варіації в 20% здатна збільшити стійкість у цій зоні без будь-яких побічних ефектів для вузлів верстата. Поза цією зоною використання варіації швидкості головного руху неефективне внаслідок неможливості технічно реалізувати роботу з такими варіаціями.

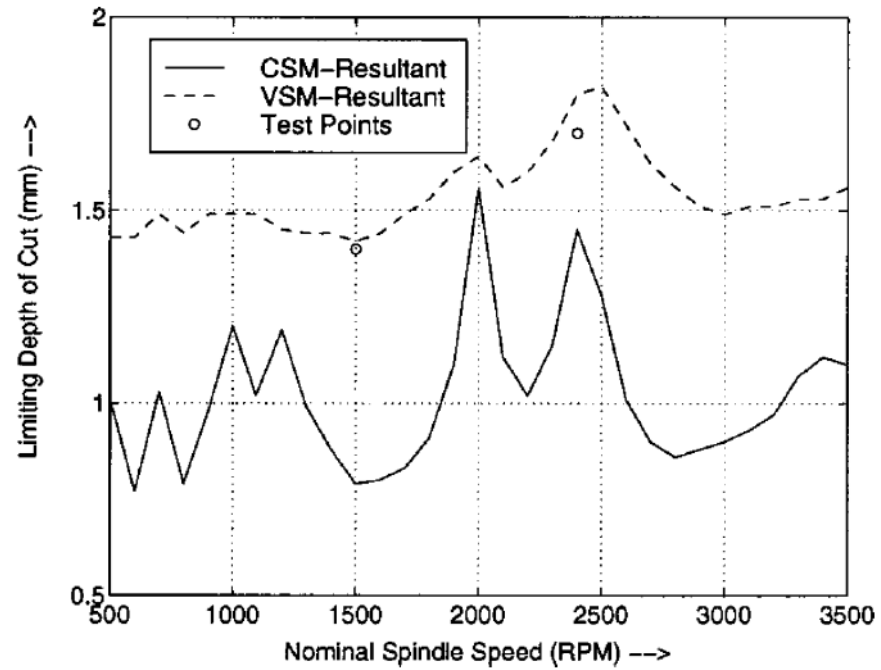


Рисунок 1.7 – Результати моделювання вібростійкості багаточастотним методом [12]

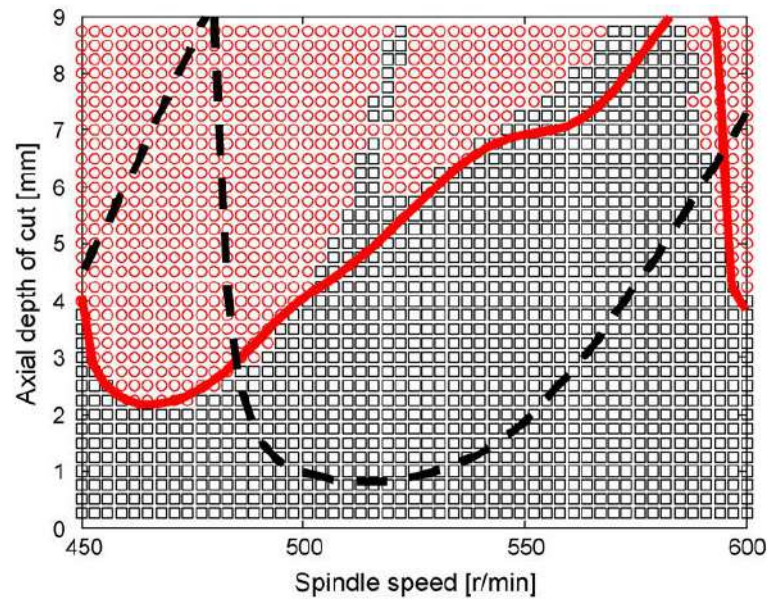


Рисунок 1.8 – Результати моделювання вібростійкості методом напівдискретизації [16]

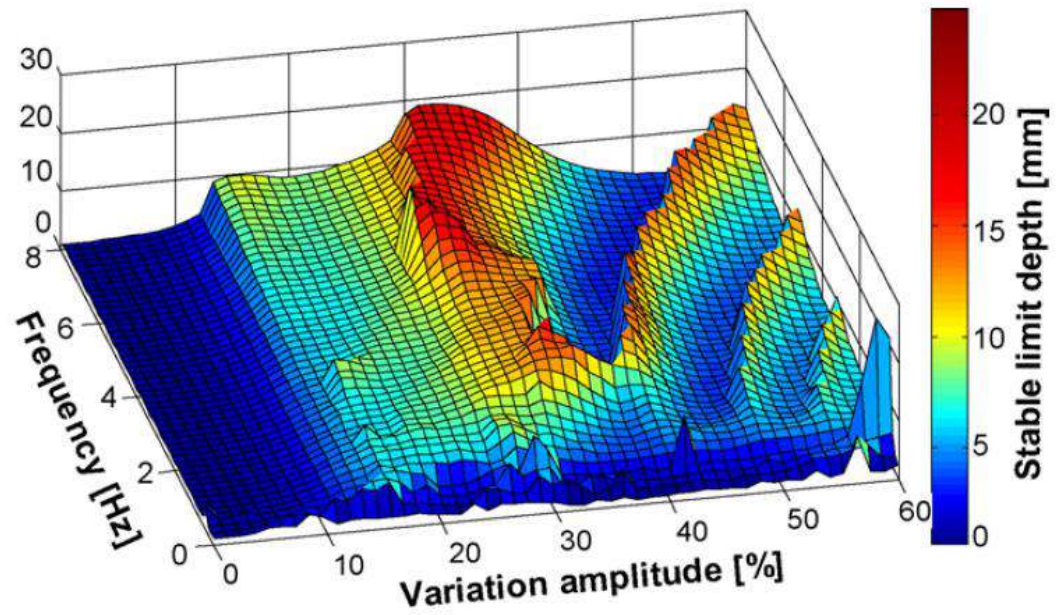


Рисунок 1.9 – Вплив синусоїдального закону зміни швидкості різання на граничну ширину стружки [12]

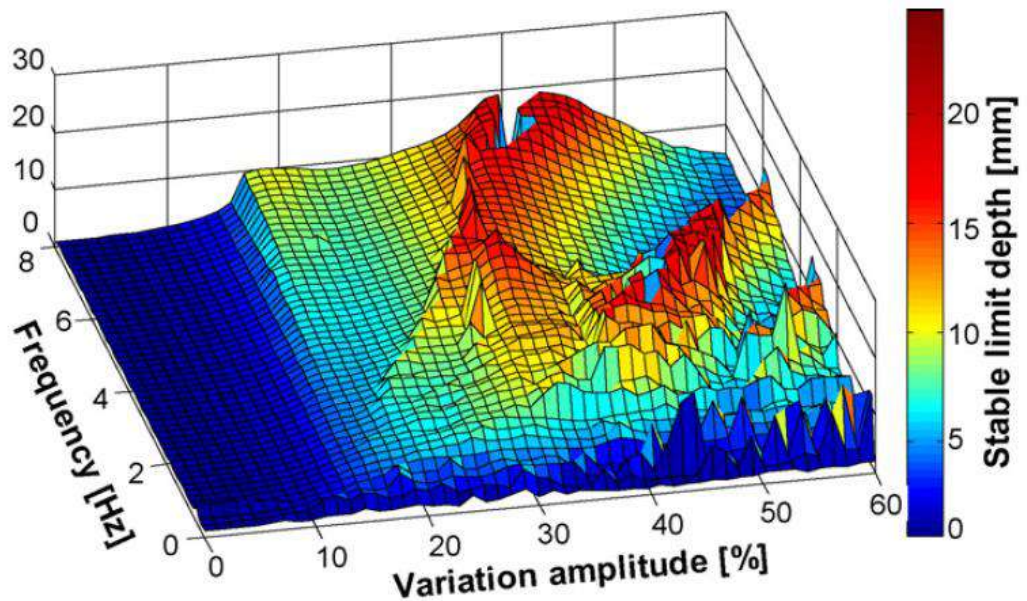


Рисунок 1.10 – Вплив пилоподібного закону зміни швидкості різання на граничну ширину стружки [12]

Ці зони з низькими частотами обертання шпинделя досить складні для моделювання вібростійкості, оскільки дуже важливо врахувати модель

демпфування. І внаслідок того, що співвідношення критичних власних частот коливань до частоти проходження зубів фрези є великим, незалежно від методу моделювання, що використовується, при вирішенні моделі виходять з матриці великого розміру. Якщо вибирається багаточастотний спосіб, точне прогнозування вимагає врахування великої кількості гармонік. У разі використання методу напівдискретизації ділянка, на якій відбувається різання, потребує більш щільної дискретизації.

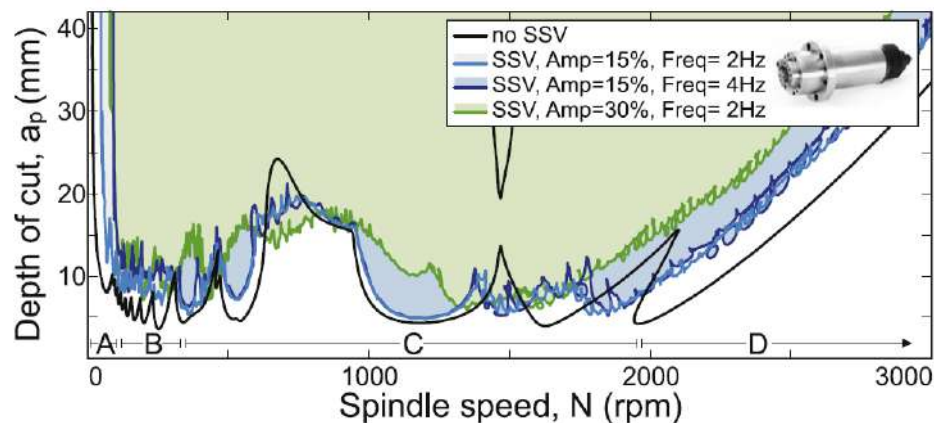


Рисунок 1.11 – Пелюсткові діаграми стійкості обробки з і без варіювання швидкістю обертання шпинделя [19]

Ці зони частот обертання шпинделя надзвичайно складні для моделювання і прогнозування стійкості, внаслідок зростаючої ролі процесів демпфування коливань задньою поверхнею інструменту і близькістю розташування сусідніх пелюсток на діаграмі стійкості.

З аналізу літературних джерел можна сказати, що основні дослідження з впливу варіювання швидкістю обертання шпинделя на зниження інтенсивності коливань при різанні проводилися при точінні і торцевому фрезеруванні, коли відсутні розриви контакту інструменту з деталлю [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]. Її ефективність пов'язана з тим, що через зміну швидкості різання на кожному оберті деталі або інструменту змінюється кількість хвиль на поверхні різання. Це руйнує

налаштування автоколивань. Але також зазначається, що не завжди виходить очікуваний результат. Для умов фрезерування тонкостінних елементів деталей, коли при різанні з малими радіальними та осьовими глибинами різання є холостий хід і інструмент постійно вривається в деталь із зубцевою частотою, дані щодо впливу варіювання швидкістю різання на інтенсивність коливань не наводяться. Тому необхідні дослідження, що перевіряють ефективність варіювання при кінцевому фрезеруванні тонкостінних елементів деталей.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КЕРУВАННЯ ФАКТИЧНОЮ ШВИДКІСТЮ РІЗАННЯ

На сьогоднішній день найбільш поширеним є застосування варіювання частотою обертання шпинделя за синусоїдальним законом з метою підвищення вібростійкості процесу токарної та фрезерної обробки. Однак, як показують дослідження [31], [32], зважаючи на надзвичайну стійкість регенеративних автоколивань, а також дії механізму їх самоорганізації, варіювання за синусоїдальним законом не завжди призводить до позитивного результату. Тому в рамках даної роботи розроблено набір алгоритмів із відповідним програмним кодом, що дозволяє максимально розширити можливості застосування сучасних систем ЧПУ впливати на зону різання через зміну законів руху.

Слід зазначити, що синусоїдальне варіювання частотою обертання шпинделя на сьогоднішній день реалізовано у верстатах фірми HAAS у вигляді програмного інтерфейсу [33], за допомогою якого оператор може задавати амплітуду та частоту зміни фактичної швидкості обробки [34], [35], [36]. Проте, механізм синхронних дій надає можливість використовувати той алгоритм управління, який буде найбільш ефективним для даної операції та

забезпечить максимальне зниження амплітуди регенеративних автоколивань [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47].

2.1 Синусоїдальне варіювання

Варіювання за синусоїдальним законом описується наступною математичною моделлю:

$$n_{\phi} = n_{\text{ном}} \cdot (1 + RVA \cdot \sin(2\pi \cdot RVF \cdot 60n_{\text{ном}} \cdot t)) \quad (1.3)$$

де n_{ϕ} – фактична частота обертання шпинделя, об/хв;

$n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання шпинделя, об/хв;

RVA – відношення амплітуди зміни фактичної частоти обертання до номінального значення останньої;

RVF – відношення частоти варіювання до номінальної частоти обертання шпинделя;

t – час, с

Оскільки в даній роботі зміна фактичних параметрів руху задається через зміну процентів, дана модель може бути перетворена на такий вигляд:

$$P = 100 + A \cdot \sin(360 \cdot F \cdot t) \quad (1.4)$$

де P – процентовка управляємої осі верстата, %;

A – амплітуда варіювання, %;

F – частота варіювання, Гц;

t – час, с

2.2 Синусоїдальне амплітудне варіювання

Математична модель зміни процентовки частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального амплітудного варіювання має вигляд:

$$\begin{aligned} A &= A_{\text{ном}} + A_{\text{amp}} \cdot \sin(360 \cdot A_{\text{freq}} \cdot t + A_{\text{phase}}) \\ P &= 100 + A \cdot \sin(360 \cdot F \cdot t + \Phi) \end{aligned} \quad (1.5)$$

де: $A_{\text{ном}}$ — номінальна амплітуда варіювання, %;

A_{amp} — амплітуда зміни амплітуди варіювання, %;

A_{freq} — частота зміни амплітуди варіювання, %;

A_{phase} — фаза зміни амплітуди варіювання, °;

A — фактичне значення амплітуди варіювання, %

F — частота варіювання, Гц;

t — час, с;

Φ — фаза зміни фактичної процентовки шпинделя.

2.3 Синусоїдальне частотне варіювання

Математична модель зміни процентовки частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального частотного варіювання має вигляд:

$$\begin{aligned} F &= F_{\text{ном}} + F_{\text{amp}} \cdot \sin(2\pi \cdot F_{\text{freq}} \cdot t + F_{\text{phase}}) \\ P &= 100 + A \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t + \Phi) \end{aligned} \quad (1.6)$$

де: $F_{\text{ном}}$ — номінальна частота варіювання, Гц;

F_{amp} – амплітуда зміни частоти варіювання, Гц;

F_{freq} – частота зміни частоти варіювання, Гц;

F_{phase} – фаза зміни частоти варіювання, Гц°;

A – амплітуда варіювання, %

F – фактична частота варіювання, Гц;

t – час, с;

Φ – фаза зміни фактичної процентовки шпинделя.

2.4 Синусоїдальне амплітудно-частотне варіювання

Математична модель зміни процентовки частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального амплітудно-частотного варіювання має такий вигляд:

$$\begin{aligned} A &= A_{\text{ном}} + A_{amp} \cdot \sin(360 \cdot A_{freq} \cdot t + A_{phase}) \\ F &= F_{\text{ном}} + F_{amp} \cdot \sin(360 \cdot F_{freq} \cdot t + F_{phase}) \\ P &= 100 + A \cdot \sin(360 \cdot F \cdot t + \Phi) \end{aligned} \quad (1.7)$$

2.5 Синусоїдальне асиметричне варіювання

Даний математичний закон управління передбачає зміну фактичної частоти обертання шпинделя за синусоїдальним законом з різною швидкістю розгону та гальмування шпинделя.

Математична модель зміни процентовки частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального асиметричного варіювання має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{F} \\
 T1 &= T * R * 2 \\
 T2 &= T * R * 2 \\
 F1 &= 1/T1 \\
 F2 &= 1/T2 \\
 \tau &= t \bmod T \\
 P &= \begin{cases} 100 + A * \sin(360 * F1 * \tau + 90); & \tau \leq T \\ 100 + A * \sin(360 * F2 * (T - \tau) + 90); & \tau > T \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

де F – середня частота варіювання, Гц;

T – середній період варіювання, с;

$T1$ - період варіювання при зниженні частоти обертання шпинделя, с;

$T2$ – період варіювання при збільшенні частоти обертання шпинделя, с;

$F1$ – частота варіювання при зниженні частоти обертання шпинделя, Гц;

$F2$ – частота варіювання при збільшенні частоти обертання шпинделя, Гц;

R – коефіцієнт асиметричності, що визначає відношення часу розгону та гальмування обертового руху шпинделя;

$\bmod$ – операція знаходження статку від ділення

2.6 Стохастичне амплітудне варіювання

Стохастичне варіювання представляє зміну фактичної частоти обертання шпинделя відповідно до математичного закону генерації випадкових чисел.

В умовах амплітудного стохастичного варіювання зміни фактичної частоти обертання шпинделя відбувається через рівний період часу T , значення якого визначається наступною математичною моделлю:

$$\begin{aligned}
 T &= const \\
 X_1 &= Td * Th * Tm * Ts * Tms \\
 X_i &= (16807 * X_{i-1}) \bmod 2147483647 \\
 X_{i-1} &= X_i \\
 P &= 100 - A + Xi / 2147483647 * 2 * A
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

де X_1 – перше число послідовності випадкових чисел;

$Td * Th * Tm * Ts * Tms$ – системні змінні часу – відповідно значення дня, часу, хвилини, секунди, мілісекунди;

X_i – поточне число послідовності випадкових чисел;

A – максимальна амплітуда варіювання, %;

P – процентовка шпинделя, %;

16807; 2147483647 – константи рівняння Лемера

Таким чином, при заданій номінальній частоті обертання шпинделя і максимальній амплітуді A , фактична частота обертання шпинделя $n_{\text{ном}}$ змінюється в діапазоні: $n_{\text{ном}} \pm n_{\text{ном}} * A / 100$.

2.7 Стохастичне частотне варіювання

В умовах стохастичного частотного варіювання зміна фактичного значення частоти обертання шпинделя відбувається через проміжки часу, значення яких визначаються послідовністю випадкових чисел і змінюються в діапазоні від

$$\Delta T_i = T_{min} \text{ до } \Delta T_i = T_{min} + T_{TOL},$$

де ΔT_i – поточний інтервал часу переключення швидкості обертання шпинделя, с;

T_{min} – мінімальний період зміни фактичної частоти обертання шпинделя, с;

T_{TOL} – інтервал часу, в межах якого розраховується послідовність випадкових чисел, с.

Слід зазначити, що фактичне значення частоти обертання шпинделя набуває лише двох значень:

$$\begin{cases} n_{\phi}^{min} = n_{ном} - A; \\ n_{\phi}^{max} = n_{ном} + A; \end{cases} \quad (1.10)$$

де n_{ϕ}^{max} – максимальне значення частоти обертання шпинделя, об/хв;

n_{ϕ}^{min} – мінімальне значення частоти обертання шпинделя, об/хв;

$n_{ном}$ – номінальне значення частоти обертання шпинделя, об/хв;

A – амплітуда варіювання, %

Таким чином, математична модель стохастичного частотного варіювання має вигляд:

$$\begin{aligned} A &= const \\ T_1 &= Td * Th * Tm * Ts * Tms \\ T_i &= (16807 * T_{i-1}) \bmod 2147483647 \\ \Delta T_i &= T_{min} + T_i / 2147483647 * T_{TOL} \\ T_{i-1} &= T_i \\ P &= 100 \pm n_{ном} * A / 100 \end{aligned} \quad (1.11)$$

де T_1 – перше число послідовності випадкових чисел часу, с;

$Td * Th * Tm * Ts * Tms$ – системні змінні часу – відповідно значення дня, часу, хвилини, секунди, мілісекунди;

T_i – поточне число послідовності випадкових чисел часу, с;

16807, 2147483647 – константи рівняння Лемера Д.Х.;

P – процентовка шпинделя, %

2.8 Стохастичне амплітудно-частотне варіювання

При амплітудно-частотному варіюванні зміна фактичної частоти обертання шпинделя відбувається за математичним законом генерації випадкових чисел. Головною особливістю даного алгоритму є те, що відповідно до випадкової послідовності чисел змінюється як безпосередньо значення частоти обертання шпинделя, так і інтервал часу ΔT_i , через який відбувається її перемикання. Щоб виключити взаємозв'язок між цими величинами, наведена нижче математична модель включає генерацію двох різних послідовностей випадкових чисел:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= Td * Th * Tm * Ts * Tms \\
 T_1 &= Th * Tm * Ts * Tms \\
 X_i &= (16807 * X_{i-1}) \bmod 2147483647 \\
 T_i &= (16807 * T_{i-1}) \bmod 2147483647 \\
 X_{i-1} &= X_i \\
 T_{i-1} &= T_i \\
 \Delta T_i &= T_{min} + T_i / 2147483647 * T_{TOL} \\
 P &= 100 - A + X_i / 2147483647 * 2 * A
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОДУ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ ІЗ ЧПУ ЗІ СТІЙКОЮ SIEMENS SINUMERIK 840 D

Оскільки написання програмного коду передбачає його використання для конкретної операції механічної обробки, наведені нижче приклади будуть описані для умов кінцевого фрезерування.

3.1 Синусоїдальне варіювання

Для написання програмного коду використовувалися такі вихідні дані:

- номінальна частота обертання шпинделя $n_{\text{ном}} = 400$ об/хв;
- амплітуда варіювання $A = 50\%$;
- частота варіювання $F = 1$ Гц.

Остаточний програмний код наведено у додатку А.

Для даних умов роботи графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя наведений на рис. 3.1.

3.2 Синусоїдальне амплітудне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено в додатку Б і складений для наступних умов обробки: $n_{\text{ном}} = 400$ об/хв; $A_{\text{ном}} = 30\%$; $A_{\text{amp}} = 20\%$; $A_{\text{freq}} = 0,5$ Гц; $A_{\text{phase}} = 0^\circ$; $F = 5$ Гц; $\Phi = 0^\circ$.

На рис. 3.2 наведено графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом синусоїдального амплітудного варіювання.

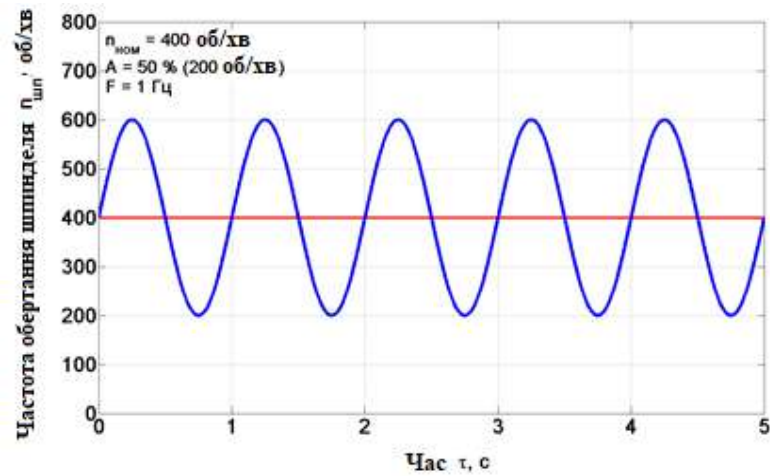


Рисунок 3.1 – Графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя за синусоїдальним законом

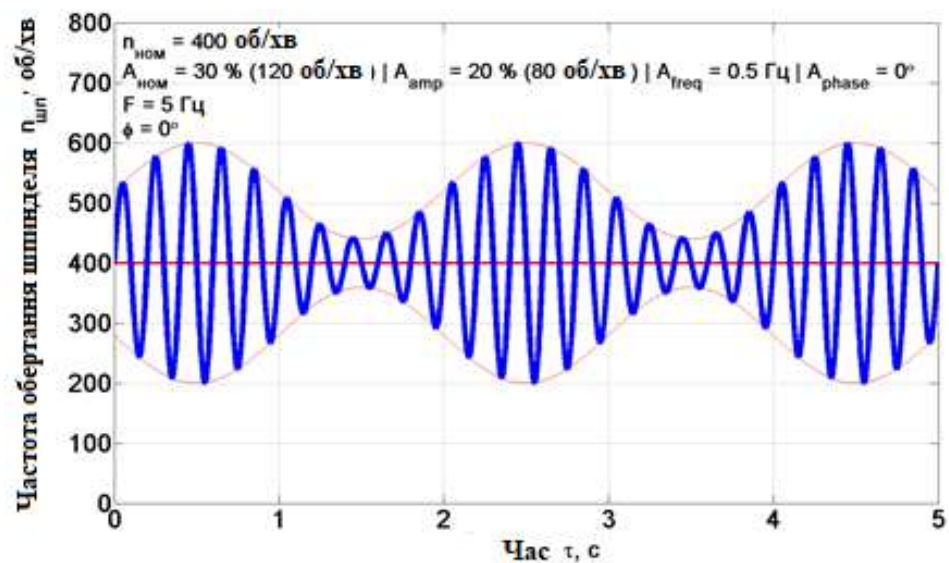


Рисунок 3.2 – Графік зміни частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального амплітудного варіювання

3.3 Синусоїдальне частотне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено в додатку В і складений для наступних умов обробки: $n_{\text{ном}} = 400$ об/хв; $A = 50\%$; $F_{\text{ном}} = 6$ Гц; $F_{\text{amp}} = 3,6$ Гц; $F_{\text{freq}} = 0,7$ Гц; $F_{\text{phase}} = 0^\circ$; $\Phi = 0^\circ$. На рис. 3.3 наведено графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом синусоїдального частотного варіювання.

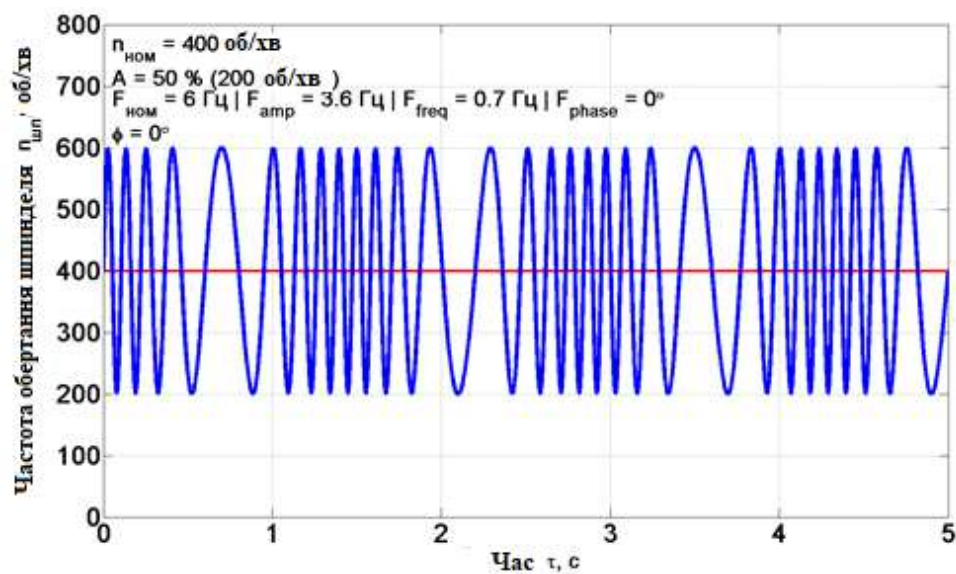


Рисунок 3.3 - Графік зміни частоти обертання шпинделя згідно із законом синусоїдального частотного варіювання

3.4 Синусоїдальне амплітудно-частотне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено у додатку Г та складено для наступних умов обробки: $n_{\text{ном}} = 400$ об/хв; $A_{\text{ном}} = 30\%$; $A_{\text{amp}} = 20\%$; $A_{\text{freq}} = 0,5$ Гц; $A_{\text{phase}} = 0^\circ$; $F_{\text{ном}} =$

6 Гц; $F_{amp} = 3$ Гц; $F_{freq} = 1$ Гц; $F_{phase} = 0^\circ$; $\Phi = 0^\circ$. На рис. 3.4 наведено графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом синусоїдального амплітудно-частотного варіювання.

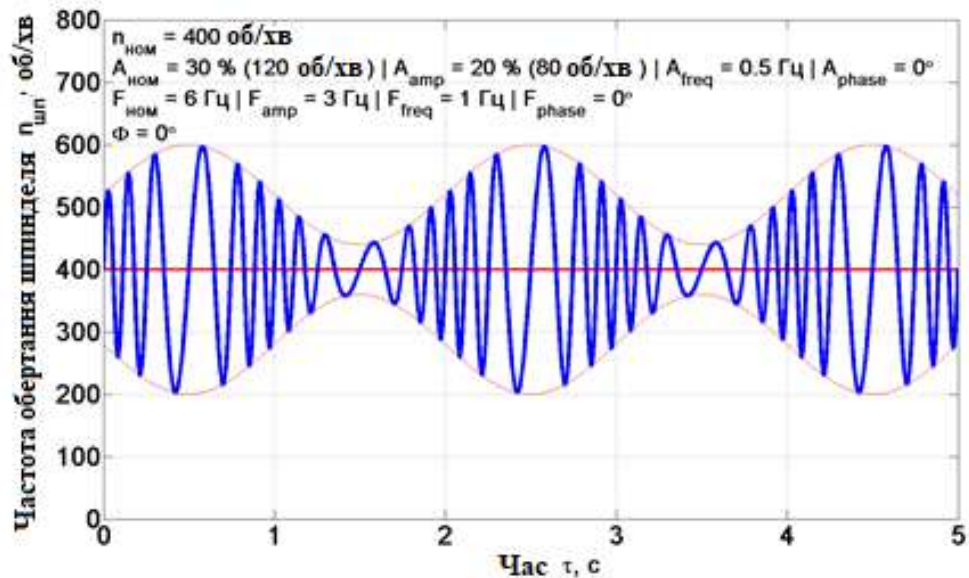


Рисунок 3.4 – Графік зміни частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального амплітудно-частотного варіювання

3.5 Синусоїдальне асиметричне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено у додатку Д та складено для наступних умов обробки: $n_{ном} = 400$ об/хв; $A = 50\%$; $F = 2$ Гц; $R = 0.1$. На рис. 3.5 наведено графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом синусоїдального асиметричного варіювання.

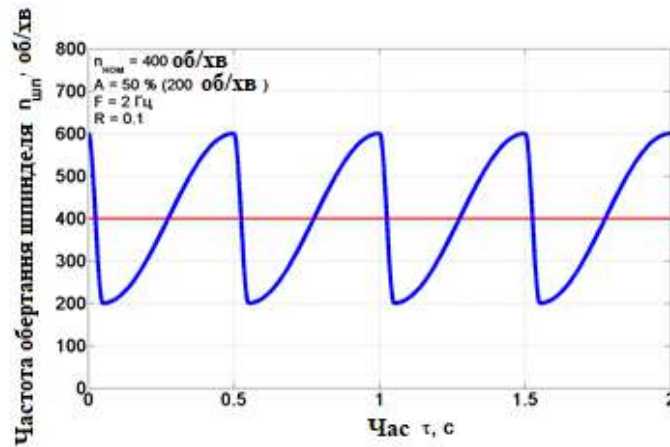


Рисунок 3.5 – Графік зміни частоти обертання шпинделя за законом синусоїдального асиметричного варіювання

3.6 Стохастичне амплітудне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено у додатку Е та складено для наступних умов обробки: $n_{ном} = 500$ об/хв; $A = 50\%$; $T = 0,2$ с. На рис. 3.6 наведено графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом стохастичного амплітудного варіювання.

3.7 Стохастичне частотне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено в додатку Ж і складений для наступних умов обробки: $n_{ном} = 400$ об/хв; $A = 50\%$; $T_{min} = 0,05$ с; $T_{TOL} = 0,35$ с. На рис. 3.7 наведено

графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом стохастичного частотного варіювання.

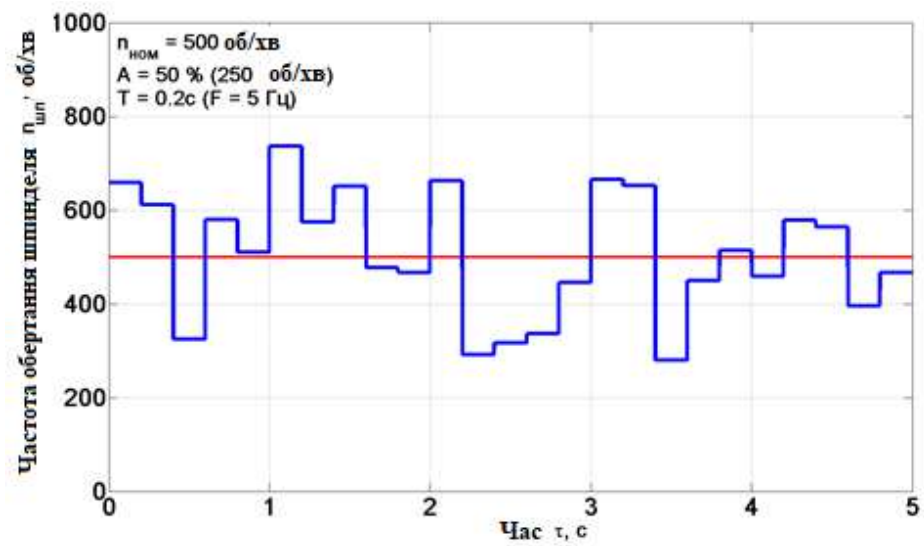


Рисунок 3.6 – Графік зміни частоти обертання шпинделя згідно із законом стохастичного амплітудного варіювання

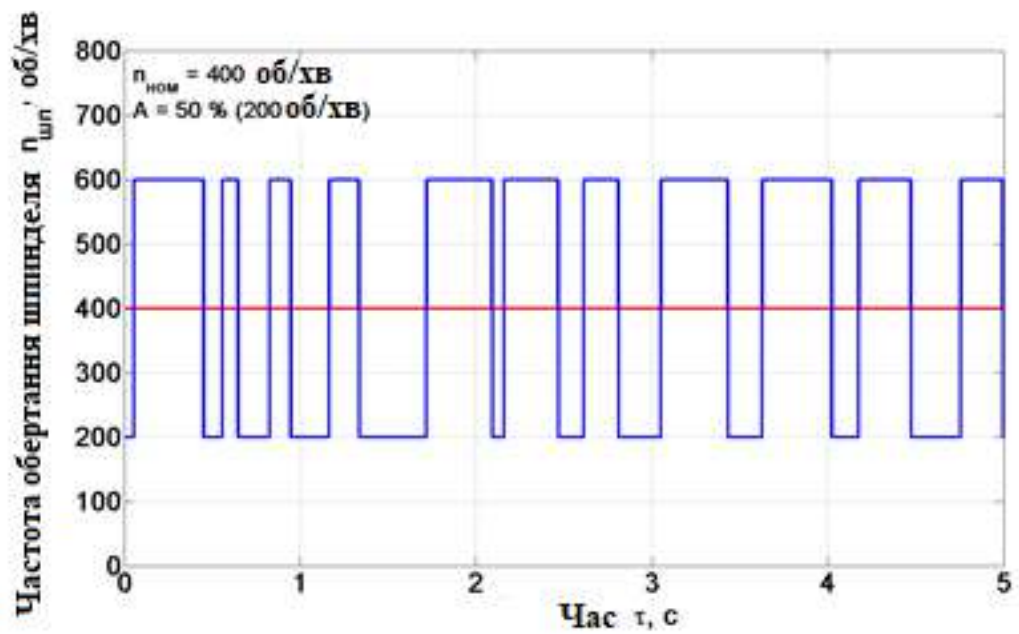


Рисунок 3.7 – Графік зміни частоти обертання шпинделя згідно із законом стохастичного частотного варіювання

3.8 Стохастичне амплітудно-частотне варіювання

Програмний код, що реалізує цю математичну модель на стійці ЧПУ, наведено в додатку К і складений для наступних умов обробки: $n_{\text{ном}} = 500$ об/хв; $A = 50\%$; $T_{\text{min}} = 0,02$ с; $T_{\text{TOL}} = 0,2$ с. На рис. 3.8 наведено графік зміни фактичної частоти обертання шпинделя згідно із законом стохастичного амплітудно-частотного варіювання.

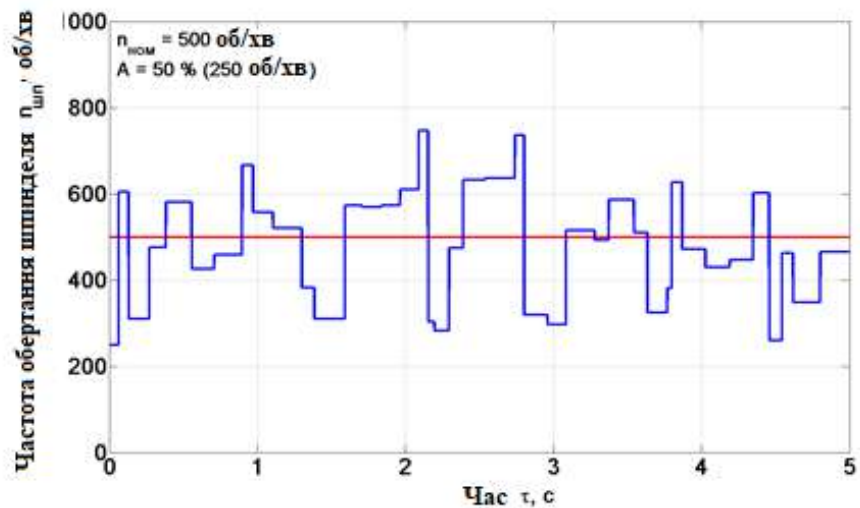
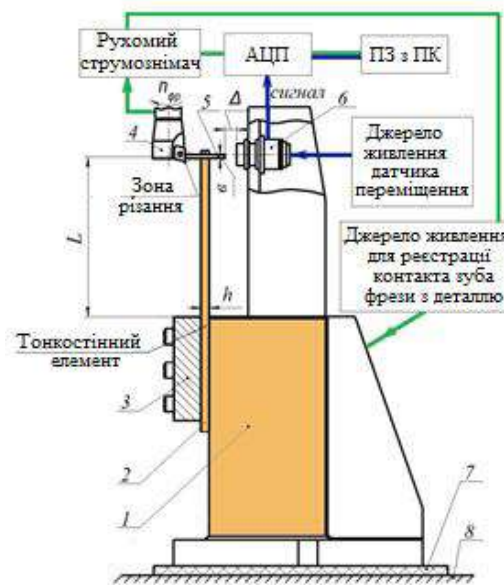


Рисунок 3.8 – Графік зміни частоти обертання шпинделя згідно із законом стохастичного амплітудно-частотного варіювання

4 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Дослідження процесу кінцевого фрезерування проводилося на спеціальному стенді (рис.4.1) [48], що дозволяє моделювати різні умови різання, за рахунок управління динамічними характеристиками заготовки та використання зразків із різних матеріалів [48].



1 – масивна основа стенду; 2 – пружна система тонкостінного елемента; 3 – притиск; 4 – кінцева фреза; 5 – оброблюваний зразок; 6 – датчик переміщення; 7 – електроізолятор; 8 – стіл фрезерного верстата

Рисунок 4.1 - Стенд для дослідження динамічних процесів при фрезеруванні [48]

В основі його конструкції лежить відтворення тонкостінного елемента деталі на масивній основі, якою є основа стенду (частота вільних коливань 60Гц) – 1. До неї жорстко кріпиться притиском – 3 тонкостінна пластина – 2, що моделює пружну систему (ПС) тонкостінного елемента деталі. За рахунок зміни вільноти пластини – L та її товщини – h можна змінювати статичні та динамічні характеристики ПС. У верхній частині пластини - 2 жорстко

кріпиться зразок, що обробляється - 5, який можна змінювати. Це дозволяє досліджувати зону різання під час обробки різних матеріалів. У процесі фрезерування зразка фрезою – 4, під дією змушуючої сили з боку фрези, тонкостінна пластина – 2 пружно деформується, змінюючи відстань – Δ до датчика – 6 (індуктивний проксиметр XS1M18AB120)

Опора датчика кріпиться на основі стенда, щоб виключити при записі коливання пружної системи верстата. Сигнал датчика оцифровується за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) Е-140 фірми L-Card, запам'ятовується та записується з використанням програмного забезпечення (ПЗ), на персональний комп'ютер (ПК). У комплектації стенда передбачено електроконтактний пристрій для фіксування входу зуба фрези в заготовку та його виходу, що дозволяє на осцилограмі визначати часові інтервали різання, що включають період зубцевої частоти, час різання та холостого ходу. Для цього вимірювальний стенд електроізолюють від столу фрезерного верстата – 8 шляхом встановлення на електроізоляційну пластину – 7.

Матеріалом для зразків був обраний титановий сплав ВТ6, що має низьку оброблюваність (коефіцієнт відносної оброблюваності 0,22 порівняно з вуглецевою сталлю 45) і з якого виготовляються тонкостінні деталі, наприклад, лопатки.

Розміри зразка 50x20x2мм (довжина x ширина x висота) (рис. 4.2) обрані таким чином, щоб по довжині його можна було встановити на пружній пластині, та, використовуючи його ширину, можна було б проводити багаторазову обробку. Товщина зразка відповідає осьовій глибині різання.



Рисунок 4.2 – Зразок для дослідження динамічних процесів при кінцевому фрезеруванні

Виліт пружної пластини в пристрої залежить від того, яку частоту вільних коливань (ЧВК) треба забезпечити зразком. І тому треба знати частоти вільних коливань деталей – прототипів. За інформацією, наведеною в джерелі [49], ЧВК лопаток коливається від 200 Гц для осьових моноколів газотурбінних двигунів (ГТД) великого діаметра до 2500 Гц для відцентрових колів малого діаметра. Крім цього методом ударного збудження (рис.4.3) було визначено ЧВК лопаток, конструкції яких наведені на (рис.4.4) та які входять у конструкції компресорів ГТД.



Рисунок 4.3 – Визначення ЧВК лопатки методом ударного збудження



Рисунок 4.4 – Конструкції лопаток компресорів ГТД

У таблиці 4.1 записані значення ЧВК лопаток, показаних на рис.4.4.

Таблиця 4.1 - ЧВК лопаток

Номер лопатки	1	2	3	4
Частота вільних коливань, Гц	805	561	317	317

Перш, ніж налаштовувати динамічні характеристики зразка на стенді, треба знати закономірності появи видів коливань при лезовій обробці і які коливання діють при кінцевому фрезеруванні.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВАРІАЦІЙ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

5.1 Визначення закономірності виникнення видів коливань при лезовій обробці

Точність обробки, шорсткість поверхні, продуктивність та стійкість інструменту при лезовій обробці залежать від вібрацій, що виникають при різанні. При цьому розрізняють такі види коливань: вимушені, автоколивання та вільні. Кожне із них має свої відмінні ознаки.

Вимушені коливання виникають під дією змушуючої сили при врізанні інструменту в деталь. Їхня частота залежить від частоти врізання інструменту.

Вільні коливання виникають після виведення деталі з положення пружної рівноваги (ППР) та зняття прикладеної сили. Частота вільних коливань залежить від внутрішніх властивостей коливальної системи. Під впливом сил тертя вільні коливання згасають.

Автоколивання - незатухаючі коливання, що підтримуються за рахунок енергії постійного неперіодичного зовнішнього впливу. Частота автоколивань залежить від внутрішніх властивостей коливальної системи.

У літературних джерелах [49 та ін.] в загальних рисах зазначається, що будь-яке збудження при різанні призводить до виникненню власних загасаючих коливань технологічної системи, а незатухаючі автоколивання настають після 5-10 обертів (для однолезових інструментів) або після проходу 8-20 зубів (для багатолезових інструментів). У зв'язку з цим виникає актуальне питання, а які коливання діють при кінцевому циліндричному фрезеруванні, коли інструмент періодично врізається в деталь?

Для відповіді на нього необхідно встановити закономірність появи різних видів коливань.

Виходячи з того, що будь-яка лезова обробка починається з удару при врізанні інструмента в деталь, моделювання виникнення коливань при різанні виконувалося при точінні циліндричної заготовки з поздовжнім пазом (рис.5.1). Це забезпечує однакові умови різання на кожному оберті тим, що інструмент завжди врізається в деталь.

Різання виконувалося різцем, конструкція якого має найменшу жорсткість вздовж дії осьової сили P_x (рис.5.2). Різець встановлюється у спеціальному пристрої (рис.5.3), який кріпиться у різцетримачі верстата. При точінні заготовки $\varnothing 60\text{мм}$ зі сталі 45 різцем зі змінною багатогранною пластиною з ВК8 з частотою обертання шпинделя 800об/хв, глибиною різання 1мм і подачею 0,1мм/об записувалися поздовжні коливання різця з відміткою початку і закінчення різання. Частота вільних коливань різця 735Гц.



Рисунок - 5.1 Заготовка з пазом для дослідження закономірностей коливань

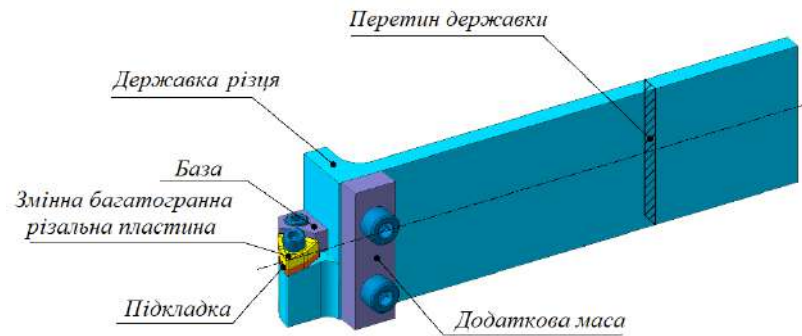
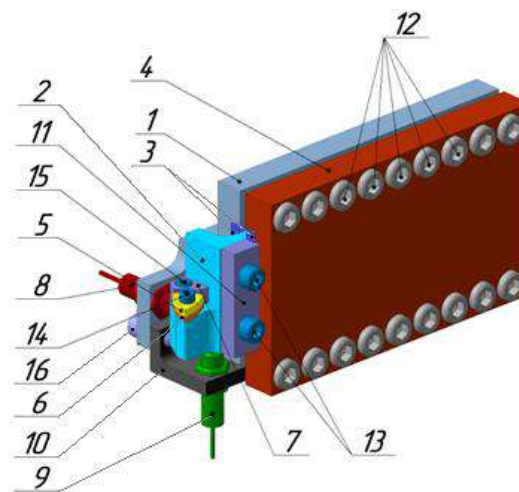


Рисунок 5.2 - Конструкція різця

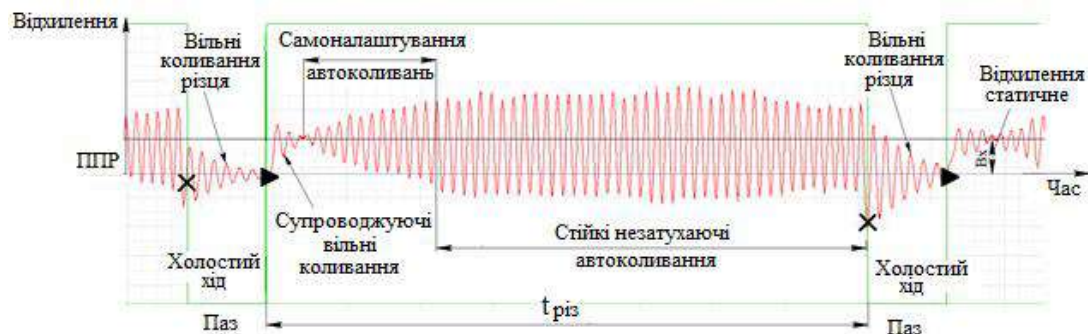


1 – корпус; 2 – державка різця; 3 – прямокутні напрямні; 4 – допоміжна кришка; 5 – різальна пластина; 6 – підкладка; 7 – база; 8, 9 – струмовихрвові датчики переміщень; 10 – кронштейн; 11 – додаткова маса; 12 – гвинти кріплення допоміжної кришки; 13 – гвинти кріплення додаткової маси; 14 – гвинт кріплення різальної пластини; 15 – гвинт кріплення бази; 16 – гвинт кріплення кронштейна.

Рисунок 5.3 - Пристрій для дослідження коливань при точінні

На рис.5.4 показаний фрагмент осцилограми осьових коливань різця при точінні заготовки з поздовжнім пазом, де показана закономірна послідовність утворення коливань при періодичному врізанні інструменту деталь.

На початку при врізанні від змущуючої сили виникають вимушені коливання з амплітудою, що дорівнює статичному відхиленню B_x (рис.5.4). Пружна система «інструмент – деталь» виводиться із рівноваги, відхиляється від ППР. При цьому збуджуються власні коливання технологічної системи, що накладаються на вимушені коливання. За визначенням Пановко Я.Г. [50], щоб відрізнити ці коливання від власних коливань різця, вони називаються супроводжуваними вільними коливаннями технологічної системи, які під дією сил тертя згасають. Далі при різанні коливання системи самоналаштовуються і переходять у стійкі, незатухаючі автоколивання. Такий цикл повторюється після кожного врізання інструменту в деталь. На підставі цього можна зробити висновок про закономірну послідовність виникнення коливань при лезовій обробці: вимушені коливання – супроводжувачі вільні коливання технологічної системи – автоколивання – вільні коливання різця.



► - врізання різця в деталь; x – вихід різця з деталі

Рисунок 5.4 - Фрагмент осцилограми при точінні заготовки з поздовжнім пазом

З аналізу фрагментів осцилограм можна сказати, що кожен вид коливань має власну часову тривалість і місце на поверхні різання. Так, для виконаного дослідження вимушені коливання діють від врізання різця і до його виходу із

зони різання протягом 0,066с. Супроводжуючі вільні коливання з частотою 806Гц загасають через 0,004с після врізання інструменту. Відразу після цього на протязі 0,019с відбувається самоналаштування коливань, що переходять у стійкі, незатухаючі автоколивання з частотою 863Гц, які діють до закінчення різання на протязі 0,043с. При холостому ході фрези з'являються вільні коливання різця з частотою 735Гц. Слід зазначити, що кожен вид коливань на осцилограмі безпомилково можна виділити за характерними ознаками, які були зазначені вище.

Отримані дані використовувалися для визначення видів коливань при кінцевому фрезеруванні.

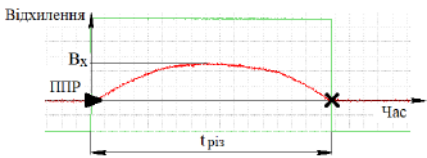
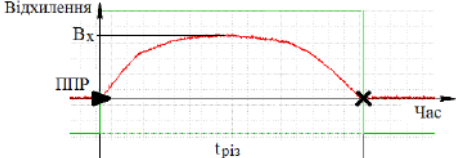
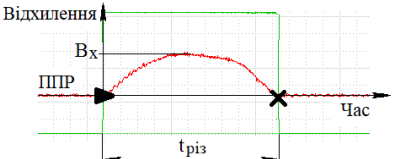
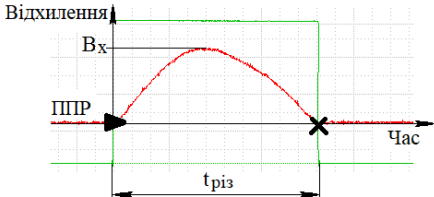
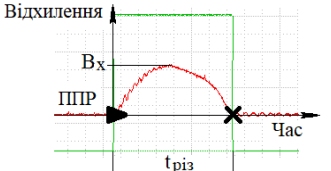
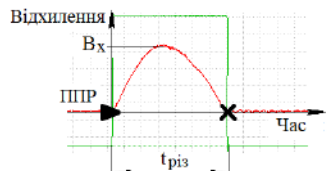
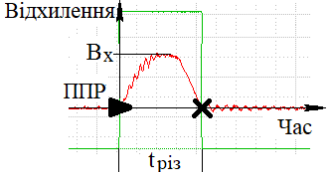
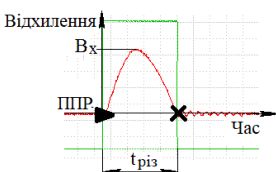
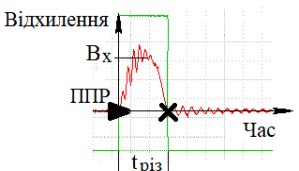
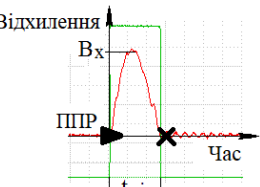
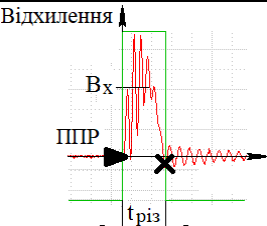
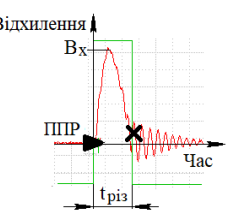
5.2 Визначення видів коливань при кінцевому фрезеруванні

На підставі того, що кожен вид коливань має певну послідовність появи та час дії, були проаналізовані осцилограми коливань зразків з алюмінію при кінцевому зустрічному та попутному фрезеруванні з режимами різання: осьова глибина різання 4мм, радіальна глибина різання 0,3мм, подача на зуб 0,1мм, частоти обертання шпинделя 80, 120, 200, 300, 500, 700 об/хв, що наведені в таблиці 5.1.

Експерименти проводилися на спеціальному стенді (рис.4.1) [48], що дозволяє записувати тривалість різання та моделювати обробку деталей з різними динамічними характеристиками. Частота вільних коливань зразка 610Гц.

На підставі наведених фрагментів осцилограм можна сказати, що при кінцевому фрезеруванні з періодичним врізанням інструменту види коливань залежать від часу різання, що зумовлений частотою обертання шпинделя.

Таблиця 5.1 - Фрагменти осцилограм коливальнь деталі при зустрічному та попутному кінцевому фрезеруванні з різною частотою обертання шпинделя

Частота обертання шпинделя, об/хв	Напрямок подачі	
	Зустрічне	Попутне
80		
120		
200		
300		
500		
700		

При частотах обертання шпинделя 80 об/хв, 120 об/хв діють лише вимушені коливання як при зустрічному, і при попутному фрезеруванні. Статичне відхилення деталі від вимушених коливань V_x практично не залежить від частоти обертання шпинделя. При 200 об/хв на вимушені

коливання накладаються супроводжуючі вільні коливання, що затухають. Їхня амплітуда зі збільшенням частоти обертання шпинделя збільшується, а час різання зменшується. Значення амплітуди супроводжуючих вільних коливань та часу різання в залежності від частоти обертання шпинделя наведено в таблиці 5.2. Зменшення часу різання при кінцевому фрезеруванні не дозволяє після згасання супроводжуючих вільних коливань самоналаштуватися автоколиванням, щоб прийняти стійкий, незатухаючий характер. На підставі цього можна зробити висновок, що при кінцевому фрезеруванні автоколивань немає. На стійкість інструменту, якість обробленої поверхні впливає інтенсивність супроводжуючих вільних коливань технологічної системи.

Таблиця 5.2 Характеристики коливань зразків при кінцевому фрезеруванні з різними частотами обертання шпинделя

Показник	Частота обертання шпинделя, об/хв	Напрямок подачі	
		Зустрічне	Попутне
Амплітуда супроводжуючих вільних коливань A_{CBK} , мм	80	0	0
	120	0,002	0
	200	0,003	0
	300	0,006	0
	500	0,023	0,003
	700	0,063	0,008
Частота супроводжуючих вільних коливань f_{CBK} , Гц	80	833	
	120		
	200		
	300		
	500		
	700		833

Продовження таблиці 5.2

Час різання $t_{різ}$, 10^{-3} сек	80	66,32	67,48
	120	41,4	43,36
	200	26,6	26,52
	300	17,36	17,8
	500	10	10,92
	700	9,52	9,6

Так як інтенсивність супроводжуючих вільних коливань залежить від початкової умови, як швидкість різання, то слід виконати її розподіл на зони в залежності від амплітуди коливань.

5.3 Визначення швидкісних зон коливань при кінцевому фрезеруванні

Відомо, що несприятливий вплив інтенсивності коливань на стійкість інструменту спостерігається за їхньої амплітуди, що перевищує 0,020 мм [49]. Тому треба визначити при яких швидкостях різання які амплітуди коливань виникають. Для цього використовується визначальне співвідношення (BC). Воно розраховується як відношення часу різання ($t_{різ}$) до періоду вільних коливань (T_{BK}) і показує скільки хвиль коливань охоплюється часом різання ($BC=t_{різ}/T_{BK}$) [54]. За статистичним аналізом залежності амплітуди коливань від швидкості різання визначені 5 швидкісних зон коливань.

У першій швидкісній зоні діють лише вимушені коливання (рис. 5.5). Врізання інструменту відбувається в нерухому деталь. Під дією змушуючої сили деталь відтискається, але супроводжуючі вільні коливання технологічної системи не виникають. Після виходу інструменту із зони різання під час холостого ходу вільних коливань деталі немає. У першій швидкісній зоні $BC=(t_{різ}/T_{BK}) \geq 25$.

У другій швидкісній зоні після початку різання спостерігається накладання на вимушені коливання супроводжуючих вільних коливань з амплітудою менше 0,02 мм.

Після виходу інструменту із зони різання під час холостого ходу деталь здійснює власні затухаючі коливання (рис. 5.6). У другій швидкісній зоні коливань ВС знаходиться в діапазоні від 25 до 7 ($7 < (t_{різ}/T_{ВК}) < 25$).

У третій швидкісній зоні коливань на вимушені коливання накладаються супроводжуючі вільні коливання технологічної системи з періодом $T_{СК}$ та з амплітудою більше 0,02 мм. Під час холостого ходу після виходу інструменту з зони різання діють вільні коливання деталі (рис. 5.7). У третій швидкісній зоні коливань ВС знаходиться в діапазоні від 7 до 1 ($1 \leq (t_{різ}/T_{ВК}) \leq 7$).

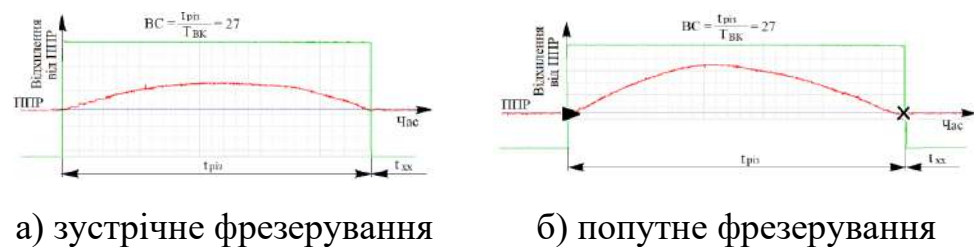


Рисунок 5.5 – Фрагменти осцилограм коливань деталі у першій швидкісній зоні коливань

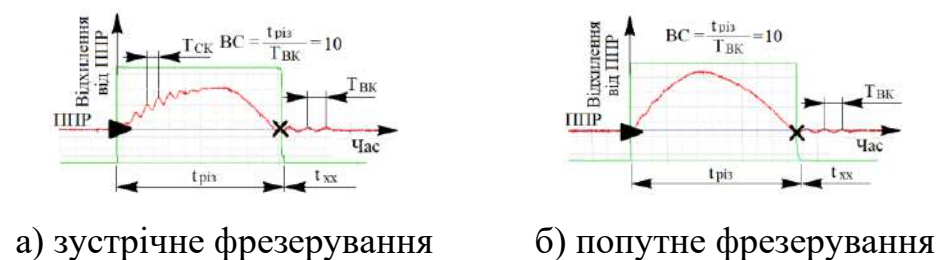


Рисунок 5.6 – Фрагменти осцилограм коливань деталі у другій швидкісній зоні коливань

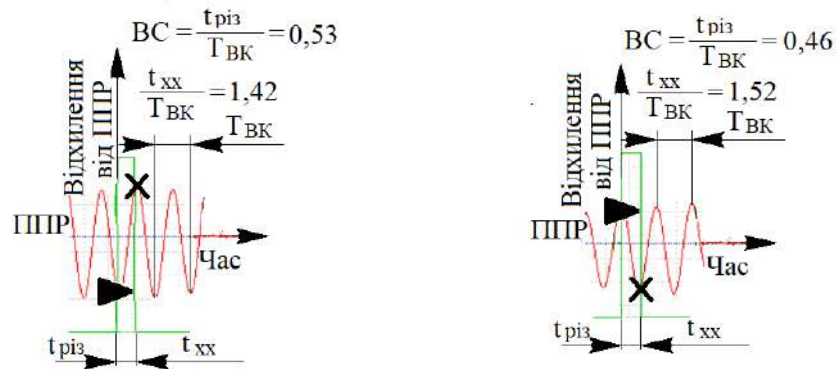


а) зустрічне фрезерування

б) попутне фрезерування

Рисунок 5.7 – Фрагменти осцилограм коливань деталі у третій швидкісній зоні коливань

У четвертій швидкісній зоні при різанні діють лише вимушені коливання (рис. 5.8). ВС менше 1 ($(t_{piz}/T_{BK}) < 1$). При цьому ще зберігається холостий хід і вільні коливання деталі та виконується нерівність $(t_{xx}/T_{BK}) \geq 1$. Супроводжуючі вільні коливання технологічної системи у четвертій швидкісній зоні не виникають через те, що час різання менший, ніж період цих коливань.



а) зустрічне фрезерування

б) попутне фрезерування

Рисунок 5.8 – Фрагменти осцилограм коливань деталі у четвертій швидкісній зоні коливань

У п'ятій швидкісній зоні діють лише вимушені коливання (рис. 5.9). Інструмент завжди врізається в деталь, що коливається. Для цієї зони характерно виконання нерівностей $(t_{piz}/T_{BK}) < 1$ і $(t_{xx}/T_{BK}) < 1$.

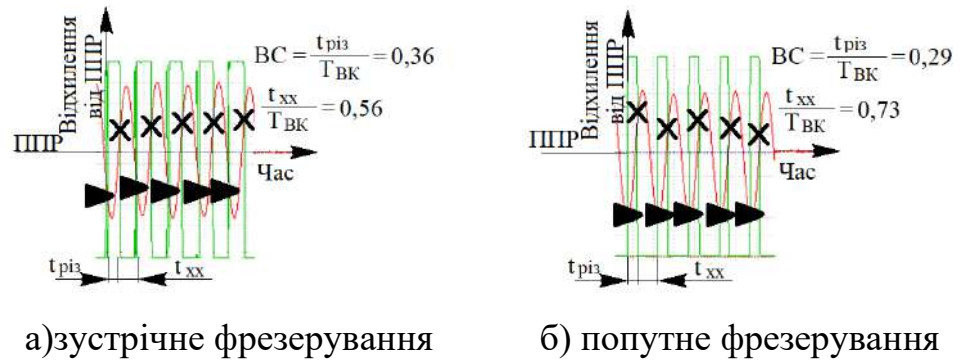


Рисунок 5.9 – Фрагменти осцилограм коливань деталі у п'ятій швидкісній зоні коливань

5.4 Оцінка зон коливань при кінцевому фрезеруванні деталей із титанових сплавів

Для кінцевого фрезерування деталей титанових сплавів рекомендовані швидкості різання вибирають з діапазону від 5 м/хв до 80 м/хв [63]. При фрезеруванні фрезою 16 мм з кутом нахилу гвинтової ріжучої кромки 35° ці швидкості відповідають частотам обертання шпинделя від 100 об/хв до 1600 об/хв. Розрахунок часу різання виконується за методикою, наведеною в [50]. ВС розраховується для наступних умов: радіальна глибина різання $a_e = 0,3$ мм, осьова глибина різання $a_p = 2$ мм, подача $S_z = 0,1$ мм/зуб, період вільних коливань зразка $T_{CK1} = 5 \cdot 10^{-3}$ сек (при $f_{CK1} = 200$ Гц) та $T_{CK2} = 4 \cdot 10^{-4}$ сек (при $f_{CK2} = 2500$ Гц). У таблиці 5.3 для розглянутих умов різання наведені розраховані значення ВС.

Значення ВС для граничних величин швидкостей різання та періодів вільних коливань показують, що кінцеве фрезерування проходитиме у другій та четвертій швидкісних зонах коливань.

Таблиця 5.3 - Розраховані значення ВС

Частота обертання шпинделя, об/хв	Подача на зуб, мм/зуб	Радіальна глибина різання, мм	Осьова глибина різання, мм	Діаметр фрези, мм	Кут нахилу гвинтової різальної кромки, град	Час різання, с	Період вільних коливань деталі, 10^{-3} с	Визначальне співвідношення	Швидкісна зона коливань
100	0,1	0,3	2	16	35	0,043	5·	8,6	2
100	0,1	0,3	2	16	35	0,043	0,4·	10,75	2
1600	0,1	0,3	2	16	35	0,003	5·	0,6	4
1600	0,1	0,3	2	16	35	0,003	0,4·	7,5	2

У другій швидкісній зоні коливань інтенсивність супроводжуючих вільних коливань не перевищує 0,02мм, а в четвертій швидкісній зоні при різанні діють тільки вимушені коливання, які впливають на величину припуску, що зрізається. Для їхнього зниження зменшують силове навантаження за рахунок зменшення подачі. Але всередині діапазону швидкостей різання від 5 до 80 м/хв і частот вільних коливань деталі від 200Гц до 2500Гц знаходиться третя швидкісна зона коливань, в якій інтенсивність супроводжуючих вільних коливань більше 0,02мм. Тому для дослідження впливу варіювання швидкістю різання на зниження інтенсивності супроводжуючих вільних коливань були обрані значення швидкостей різання та частоти вільних коливань деталі, що знаходяться всередині зазначених діапазонів (швидкості різання 40м/хв, 60м/хв, $f_{СК} = 488$ Гц, $T_{СК}=2 \cdot 10^{-3}$ с, $BC=1,5$). Вплив вихідних даних на формування обробленої поверхні та її якість при використанні варіювання швидкістю різання перевірялися при фрезеруванні однозубою та чотиризубою фрезою діаметром 16мм при наступних режимах різання:

- частота обертання шпинделя $n = 800$ об/мин $z=1$, $\varnothing 16$ мм;
- $n = 1200$ об/мин $z=4$, $\varnothing 16$ мм;
- подача $S_z = 0,1$ мм/зуб;

- радіальна глибина різання $a_e=0,2\text{мм}$;
- осьова глибина різання $a_p=2\text{мм}$;
- напрямок подачі – зустрічний та попутний.

На експериментальному стенді частота вільних коливань деталі забезпечується за рахунок вильоту пружної пластини із зразком на величину 80 мм.

Дослідження проводили на горизонтально фрезерному верстаті мод. МС668 зі стійкою ЧПУ Sinumerik 840D (рис.5.10, рис.5.11).

На робочій поверхні пристосування з вертикально встановленим столом закріплювався експериментальний стенд з тонкостінною пластиною і зразком з титанового сплаву (рис.4.2).

На стенді закріплювався індуктивний датчик для запису переміщень зразка при фрезеруванні. Стенд та оправка фрези були приєднані в електричний ланцюг, за допомогою якого реєструвався контакт інструменту з деталлю при різанні.



Рисунок 5.10 – Фрезерування зразка на верстаті МС 668 чотиризубою циліндричною фрезою

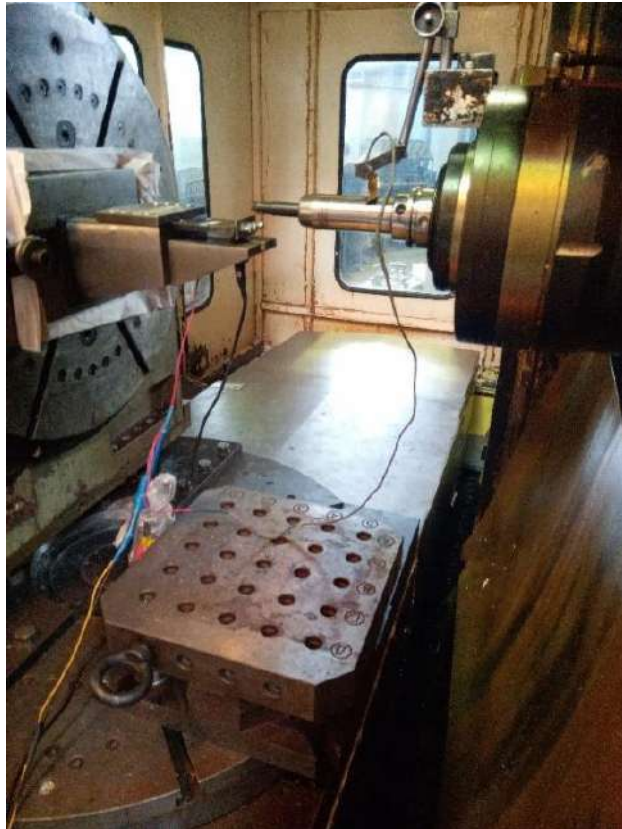


Рисунок 5.11 – Фрезерування зразка на верстаті МС 668 однозубою циліндричною фрезою

5.5 Експериментальне дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні без варіювання та з варіюванням швидкістю різання

5.5.1 Фрезерування однозубою фрезою

При визначенні впливу варіювання швидкістю різання на процес різання та оброблену поверхню використовувався однозубий інструмент з механічним кріпленням різальних пластин (рис.5.12).

Особливістю різальної пластини є наявність плоскої стрічки на задній поверхні величиною 1мм.



Рисунок 5.12 – Кінцева фреза з механічним кріпленням різальних пластин.

На рис.5.13 показано фрагмент осцилограми коливань деталі, записаний при зустрічному фрезеруванні зразка без варіювання швидкістю обертання шпинделя.

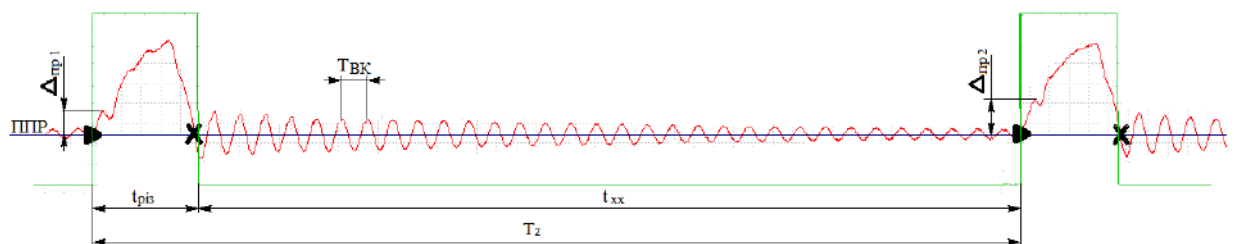


Рисунок 5.13 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання

При фрезеруванні без варіювання швидкістю різання період зубцевої частоти T_z постійний. Фреза через рівні проміжки часу врізається у деталь.

При цьому за час холостого ходу коливання не згасають і наступне врізання інструменту відбувається в деталь, що коливається з періодом T_{BK} .

Значну роль в пригніченні супроводжуваних вільних коливань відіграє стрічка на задній поверхні різальної пластини. За рахунок тертя при різанні між стрічкою та поверхнею різання супроводжувачі коливання гасяться. Але при зустрічному кінцевому фрезеруванні є особливість, яка впливає на формування обробленої поверхні. При врізанні фрези в деталь, коли стрічка ще не торкається поверхні різання, виникають супроводжувачі вільні коливання, які на осцилограмі залишаються у вигляді першої хвилі, що знаходиться на відстані $\Delta_{пр}$ від ППР (рис.5.13). Це пов'язано з тим, що різання при зустрічному кінцевому фрезеруванні починається з найменшої товщини шару, що зрізається. При подальшому просуванні фрези стрічка контактує з поверхнею різання і супроводжувачі коливання зникають. Але при формоутворенні обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні від поверхні різання залишається саме її початок з западинами від першої хвилі супроводжуваних коливань. Відстань западин до положення пружної рівноваги періодично змінюється від найбільшого значення до найменшого і на обробленій поверхні утворюється хвилястість з кроком S_w та висотою W_z (рис. 5.14). Шорсткість обробленої поверхні Ra 11,3.

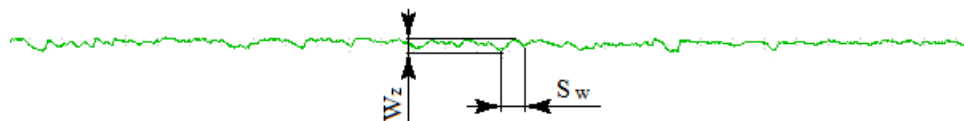


Рисунок 5.14 – Профілограма обробленої поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування без варіювання швидкістю різання

При попутному фрезеруванні різання починається з найбільшої товщини шару, що зрізається. Товщина цього шару впливає на жорсткість технологічної системи «інструмент – деталь», яка на початку різання найбільша і

зменшується до виходу фрези з зони різання. Тому на початку різання при попутному фрезеруванні, як правило, супроводжуючі коливання не виникають. Ця особливість позитивно впливає при фрезеруванні пластинами, що мають стрічку на задній поверхні. На рис.5.15 наведений фрагмент осцилограми коливань деталі при попутному кінцевому фрезеруванні фрезою зі стрічкою на задній поверхні.

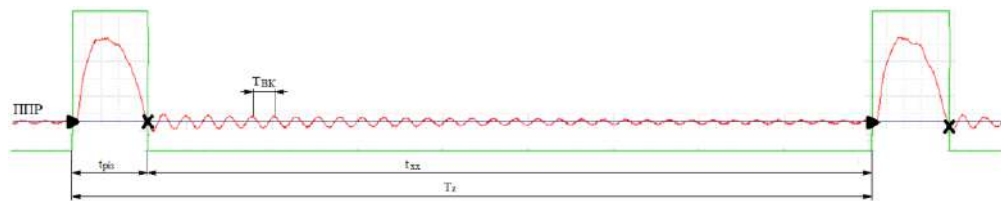


Рисунок 5.15 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при попутному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання

При попутному кінцевому фрезеруванні різальною пластиною зі стрічкою без варіювання швидкістю різання діють тільки вимушені коливання. Період зубцевої частоти не змінюється. При холостому ході спостерігаються вільні коливання з періодом $T_{вк}$. Відсутність супроводжуючих вільних коливань технологічної системи сприятливо впливає на якість обробленої поверхні. На рис.5.16 наведено профілограму обробленої поверхні після попутного фрезерування з різальною пластиною зі стрічкою на задній поверхні. Вона рівна та має шорсткість $Ra\ 2,2$.



Рисунок 5.16 – Профілограма обробленої поверхні після попутного кінцевого фрезерування.

При попутному фрезеруванні оброблена поверхня формується з западин, що залишаються від закінчення поверхні різання. При відсутності супроводжуючих вільних коливань ці западини знаходяться на однаковій відстані від ППР, тому оброблена поверхня рівна.

При використанні різальної пластини зі стрічкою на задній поверхні при попутному фрезеруванні не виникають супроводжуючі вільні коливання, тому немає потреби проводити обробку з варіюванням швидкістю різання.

Але при зустрічному фрезеруванні виникає одна хвиля супроводжуючих вільних коливань, яка впливає як на утворення хвилястості, так і на шорсткість обробленої поверхні. Тому для цього виду фрезерування було виконано дослідження впливу варіювання швидкістю різання на якість обробленої поверхні шляхом аналізу отриманих осцилограм.

Для варіювання швидкістю різання обираються такі параметри як амплітуда та частота, які показують у яких межах змінюється частота обертання шпинделя та за який час це відбувається. Дослідження проводилися з частотою варіювання 3 Гц та амплітуді 20%, які не впливають на надійність роботи приводів та вузлів верстата.

На рис. 5.17 наведено фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні з варіюванням швидкістю різання, з якого видно, що періодично змінюється період зубцевої частоти і, як наслідок, подача. В таблиці 5.4 наведені значення параметрів, які змінюються при різанні.

Таблиця 5.4 Зміни режимів різання при варіюванні швидкістю різання з частотою 3Гц та амплітудою 20%

Період зубцевої частоти T_{zi} , с	Частота обертання шпинделя n , об/хв	Подача S , мм/зуб
0,0708	847	0,094
0,0652	920	0,086
0,0736	815	0,098
0,0864	694	0,115
0,0768	781	0,102
0,0664	903	0,088

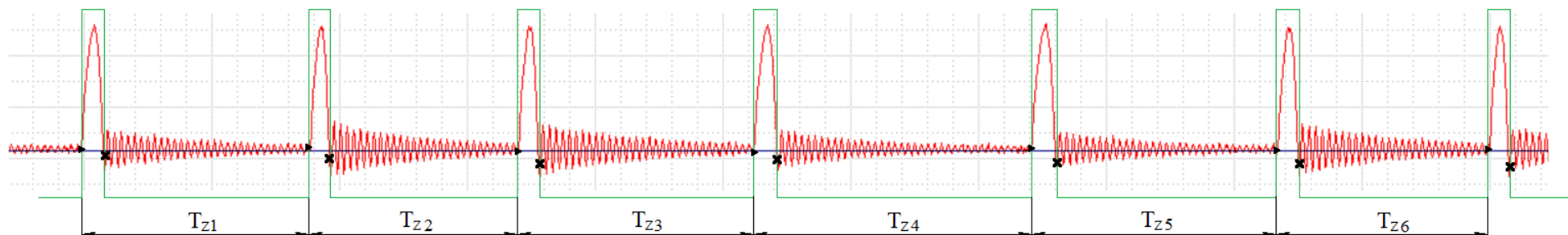


Рисунок 5.17 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні з варіюванням швидкістю різання

На рисунку 5.18 наведено графік зміни частоти обертання шпинделя відносно номінального значення 800 об/хв.

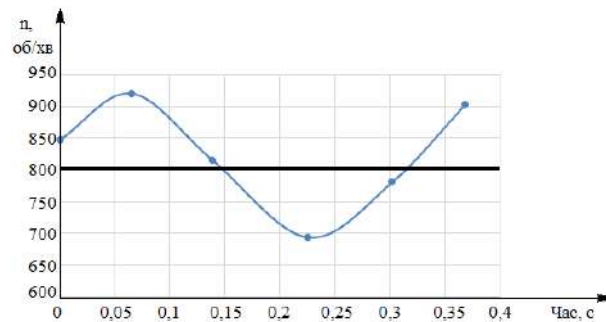


Рисунок 5.18 –Зміна частоти обертання шпинделя n при амплітуді варіювання 20% з частотою 3Гц

За період 0,33с (3Гц) частота обертання шпинделя змінюється від 920об/хв до 694об/хв з амплітудою 20%.

Деталь переміщується з постійною хвилинною подачею S_{XB} , що дорівнює 80мм/хв. Але через зміну частоти обертання шпинделя, змінюється подача на зуб фрези S відповідно до рівняння

$$S = \frac{S_{XB}}{n} \quad (2.1)$$

На рис.5.19 наведено графік зміни подачі при зустрічному фрезеруванні однозубою фрезою з варіюванням швидкістю різання.

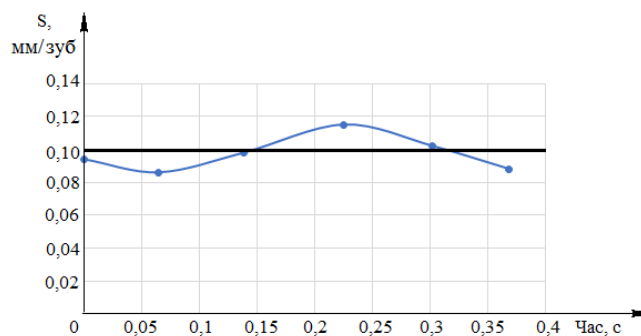


Рисунок 5.19 - Графік зміни подачі при фрезеруванні з варіюванням частоти обертання шпинделя з амплітудою 20% та частотою 3Гц

Слід зазначити, що радіальна і осьова глибина різання не змінюються, тому, незалежно від частоти обертання шпинделя, довжина поверхні різання при кожному різі фрези буде однаковою. Але при цьому зі зміною подачі відбувається зсув по фазі початку різання зубом фрези, що при наявності першої хвилі супроводжуючих вільних коливань технологічної системи на початку кожного різу буде впливати на товщину шару, що зрізається, і його демпфуючі властивості.

На рис. 5.20 показано фрагмент осцилограми коливань деталі при послідовному різанні зубів фрези на початку фрезерування. Тут видно, що при зустрічному фрезеруванні при врізанні є перша хвиля супроводжуючих вільних коливань, які далі згасають від тертя стрічки на задній поверхні з поверхнею різання.

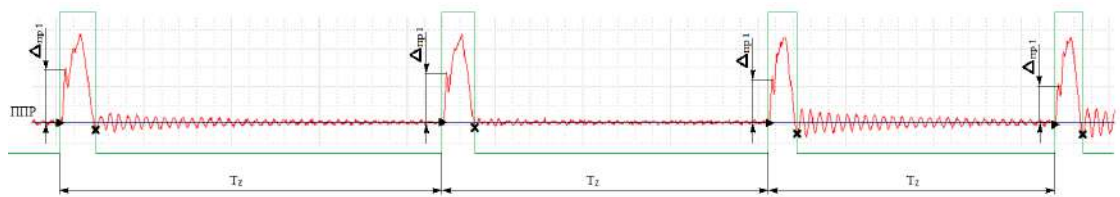


Рисунок 5.20 – Фрагмент осцилограми коливань деталі на початку різання з варіюванням швидкістю різання.

Після виходу на повну радіальну глибину різання через 33 різа зубом фрези за рахунок зміни частоти обертання шпинделя та подачі відбувається зниження інтенсивності першої хвилі супроводжуючих вільних коливань технологічної системи (рис.5.21).

Зсув по фазі початку різання при змінній подачі впливає на початкові умови щодо амплітуди супроводжуючих вільних коливань.

Використання варіювання швидкістю різання та стрічки на задній поверхні різальної пластини дозволяє забезпечити сталість процесу фрезерування в третій швидкісній зоні коливань.

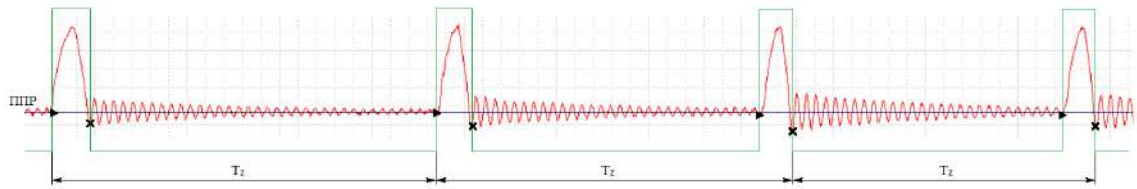


Рисунок 5.21 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні з варіюванням швидкістю різання при врізанні на повну глибину

На рис.5.22 наведено профілограму обробленої поверхні. Хвилястість на ній відсутня, а шорсткість, у порівнянні з фрезеруванням без варіювання швидкістю різання, зменшилась до $Ra\ 2,4$, тобто з третього класу до шостого.



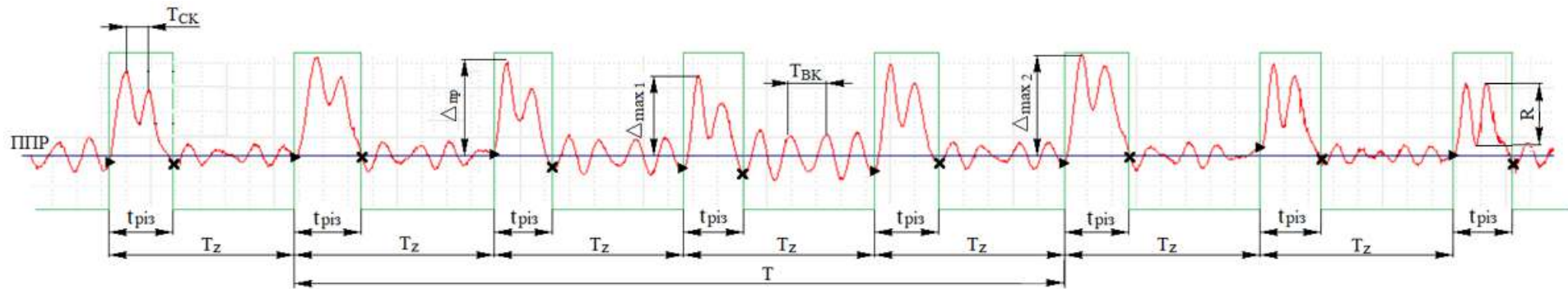
Рисунок 5.22 – Профілограма обробленої поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування з варіюванням швидкістю різання

5.5.2 Фрезерування чотирьохзубою фрезою

Фрезерування проводилося чотирьохзубою фрезою з твердого сплаву, гострозаточеними гвинтовими різальними кромками з кутом нахилу 35° , при зустрічному та попутному напрямках подачі. Радіальне биття фрези $0,03\text{мм}$.

На рис. 5.23 показано фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні чотирьохзубою фрезою без варіювання швидкістю різання.

При фрезеруванні гострозаточеною фрезою у третій швидкісній зоні коливань діють вимушені коливання та супроводжуючі вільні технологічної системи з періодом $T_{СК} = 1,2 \cdot 10^{-3}\text{ с}$ ($f_{СК}=833\text{Гц}$) та розмахом $R = 0,083\text{мм}$ (амплітуда $A=0,0415\text{мм}$).



$T_{СК}$ – період вільних супроводжуючих коливань; $T_{БК}$ – період вільних коливань деталі; $t_{різ}$ – час різання; T_z – період зубцевої частоти; T – період обертання фрези; R – розмах супроводжуючих вільних коливань; Δ_{max1} – найменша величина максимального відхилення деталі (співпадає з відхиленням від ППР першої хвилі супроводжуючих вільних коливань); Δ_{max2} – найбільша величина максимального відхилення деталі (співпадає з відхиленням від ППР першої хвилі супроводжуючих вільних коливань); $\Delta_{пр}$ – відхилення від ППР першої хвилі супроводжуючих вільних коливань.

Рисунок 5.23 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання

Після виходу зуба фрези з зони різання деталей коливається з періодом $T_{BK}=2 \cdot 10^{-3} \text{с}$ ($f_{BK}=488 \text{Гц}$). За час холостого ходу вільні коливання не згасають і фреза врізається у деталь, яка ще коливається. Час різання $t_{різ}$ та період зубцевої частоти T_z не змінюються.

Радіальне биття фрези впливає на радіальну глибину кожного зуба фрези. Тому на осцилограмі в межах періоду обертання фрези максимальні відхилення деталі $\Delta_{\max}$ мають різну величину. Слід додати, що відхилення від ППР першої хвилі супроводжуючих вільних коливань $\Delta_{\text{пр}}$, які формують оброблену поверхню, в даному дослідженні співпадають з $\Delta_{\max}$ і мають періодичну повторюваність, що призводить до хвилястості на обробленій поверхні. За результатами вимірювань $\Delta_{\text{пр}}$, значення яких наведені в додатку Л, побудовано графік, зображений на рис. 5.24.

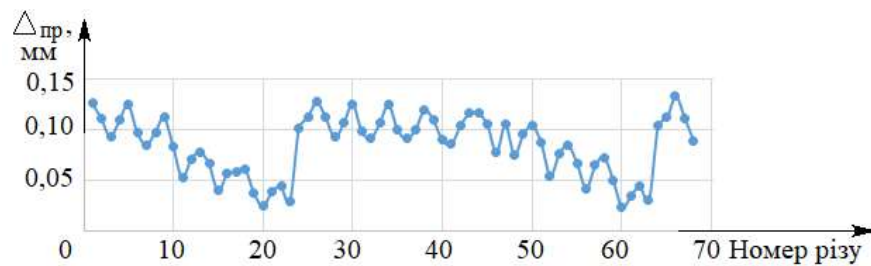


Рисунок 5.24 – Графік змін відхилення першої хвилі супроводжуючих коливань $\Delta_{\text{пр}}$ від ППР

На рис.5.25 показана профілограма обробленої поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування без варіювання швидкістю різання.

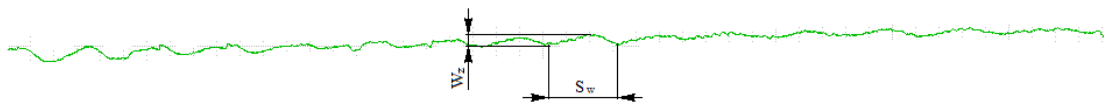


Рисунок 5.25 – Профілограма обробленої поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування без варіювання швидкістю різання

Висота хвилястості обробленої поверхні $W_z = 0,064\text{мм}$, крок хвилястості $S_w = 2,56\text{мм}$. На рис. 5.26 показано збільшений фрагмент однієї хвилі з обробленої поверхні, на якій видно накладання на основний профіль хвилястості, зумовленої радіальним биттям зубів фрези. Шорсткість обробленої поверхні після зустрічного фрезерування $Ra_{14,1}$ (третій клас шорсткості).

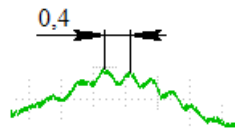


Рисунок 5.26 – Вплив радіального биття на хвилястість обробленої поверхні

Форма графіку, побудованого на рис. 5.24, та форма фрагменту хвилі, зображеної на рис. 5.25 мають ідентичний вигляд, що вказує на залежність обробленої поверхні від відхилення першої хвилі супроводжуючих вільних коливань та радіального биття.

На рис.5.26 наведено фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному кінцевому фрезеруванні з варіюванням швидкістю різання. Зі зміною швидкості різання змінюється час різання $t_{різ}$ та період зубцевої частоти T_z , період супроводжуючих вільних коливань технологічної системи та період вільних коливань деталі мають ті ж значення, що при фрезеруванні без варіювання швидкістю різання ($T_{СК} = 1,2 \cdot 10^{-3}\text{с}$, $f_{СК} = 833\text{Гц}$, $T_{ВК} = 2 \cdot 10^{-3}\text{с}$, $f_{ВК} = 488\text{Гц}$). Розмах супроводжуючих коливань $R = 0,034$ (амплітуда $A = 0,017\text{мм}$), що у 2,4 рази менше, ніж при фрезеруванні без зміни швидкості різання. На рис. 5.27 наведено графік зміни частоти обертання шпинделя при варіюванні швидкістю різання за даними таблиці 5.5

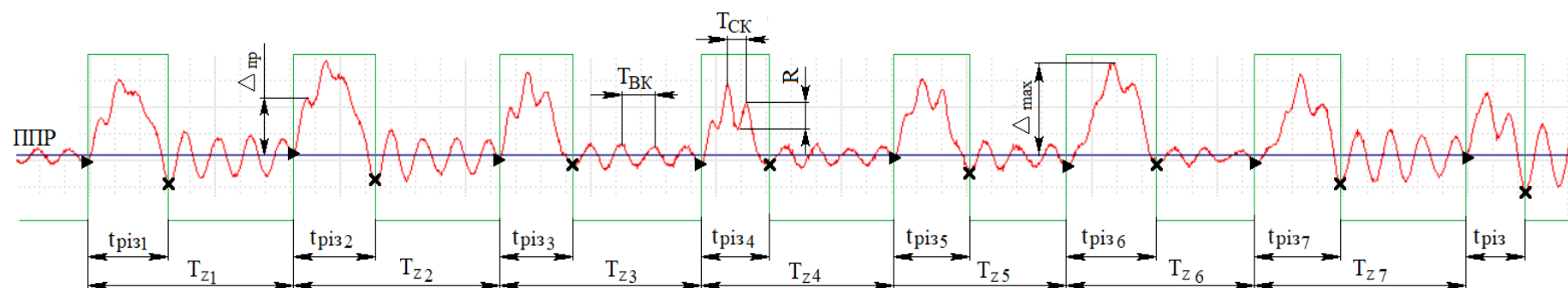


Рисунок 5.26 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при зустрічному фрезеруванні з варіюванням швидкістю різання

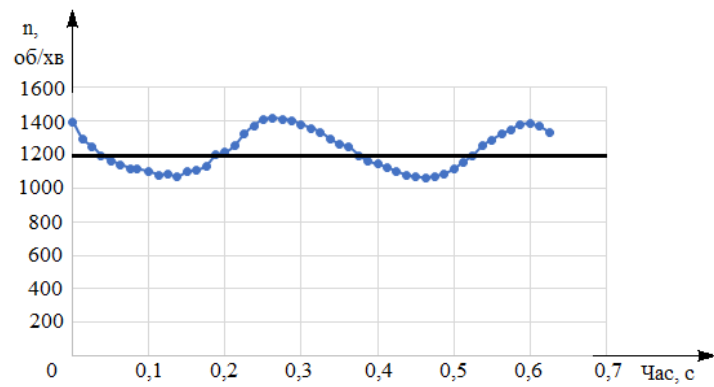


Рисунок 5.27 – Зміна частоти обертання шпинделя при амплітуді варіювання 20% та частоті 3Гц

Таблиця 5.5 Зміни режимів різання при варіюванні швидкістю різання з частотою 3Гц та амплітудою 20%

Період зубцевої частоти T_{zi} , с	Частота обертання шпинделя n , об/хв	Подача S , мм/зуб
1	2	3
0,0108	1389	0,086
0,0117	1288	0,093
0,0120	1246	0,096
0,0126	1190	0,101
0,0129	1161	0,103
0,0132	1136	0,106
0,0134	1116	0,108
0,0135	1111	0,108
0,0137	1095	0,110
0,0139	1078	0,111
0,0139	1079	0,111
0,0141	1065	0,113
0,0137	1095	0,110
0,0136	1103	0,109
0,0133	1130	0,106
0,0126	1194	0,100
0,0124	1210	0,099
0,0120	1322	0,096
0,0114	1369	0,091
0,0110	1407	0,088
0,0107	1412	0,085

Продовження таблиці 5.5

1	2	3
0,0106	1408	0,085
0,0107	1399	0,085
0,0107	1376	0,086
0,0109	1354	0,087
0,0111	1330	0,089
0,0113	1289	0,090
0,0116	1258	0,093
0,0119	1242	0,095
0,0121	1192	0,097
0,0126	1156	0,101
0,0130	1140	0,104
0,0132	1119	0,105
0,0134	1096	0,107
0,0137	1074	0,109
0,0140	1065	0,112
0,0141	1065	0,113
0,0142	1059	0,113
0,0141	1065	0,113
0,0139	1082	0,111
0,0135	1109	0,108
0,0130	1154	0,104
0,0126	1190	0,101
0,0120	1250	0,096
0,0117	1284	0,093
0,0114	1318	0,091
0,0112	1344	0,089
0,0109	1376	0,087
0,0109	1379	0,087
0,0110	1364	0,088
0,0113	1330	0,090

При амплітуді варіювання частотою обертання шпинделя 20% відносно номінального значення 1200 об/хв дійсна максимальна частота була 1412 об/хв, дійсна мінімальна частота була 1059 об/хв.

На рис. 5.28 наведено графік зміни подачі на зуб при зустрічному фрезеруванні чотиризубою фрезею з амплітудою 20% та частотою 3Гц

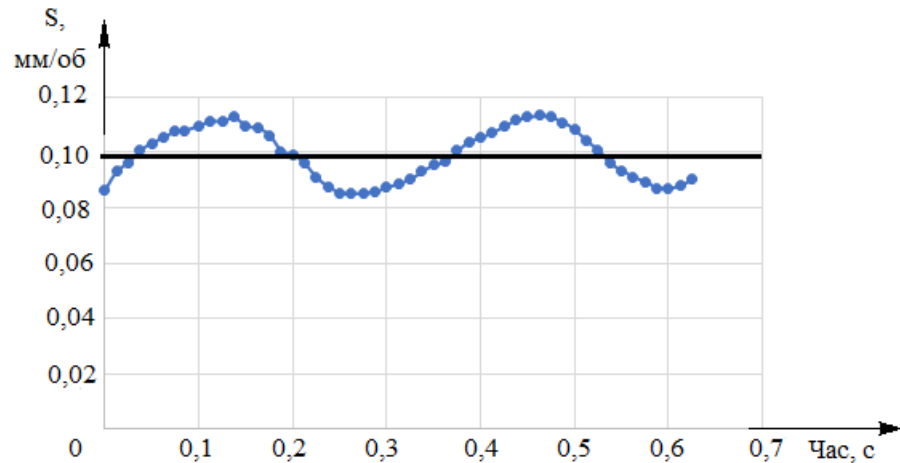


Рисунок 5.28- Графік зміни подачі при фрезеруванні з варіюванням частоти обертання шпинделя з амплітудою 20% та частотою 3Гц

На рис. 5.29 наведено профілограму поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування з частотою варіювання шпинделя 3Гц та амплітудою 20%.

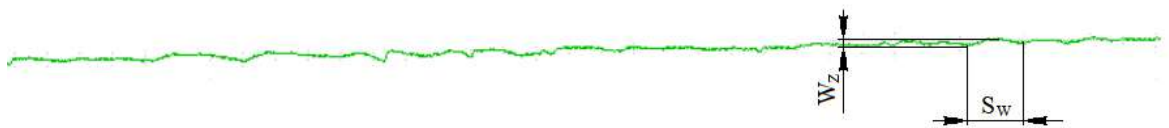


Рисунок 5.29 – Профілограма обробленої поверхні після зустрічного кінцевого фрезерування з частотою варіювання шпинделя 3Гц та амплітудою 20%

Отримана поверхня після фрезерування з варіюванням швидкістю різання має менші похибки ніж при фрезеруванні без варіювання швидкістю різання. Висота хвилястості зменшилася у 2,2 рази (була $W_z = 0,064$ мм, стала $W_z = 0,028$ мм). Крок хвилястості зменшився у 1,7 рази (був $S_w = 2,56$ мм, став $S_w = 1,5$ мм). Формоутворюючі западини на обробленій поверхні утворюються відхиленням від ППР першої хвилі супроводжуючих вільних коливань, значення яких наведені у додатку М.

На рис. 5.30 зображено графік змін відхилення від ППР першої хвилі супроводжуваних вільних коливань при зустрічному фрезеруванні з частотою варіювання швидкістю різання 3Гц та амплітудою 20%.

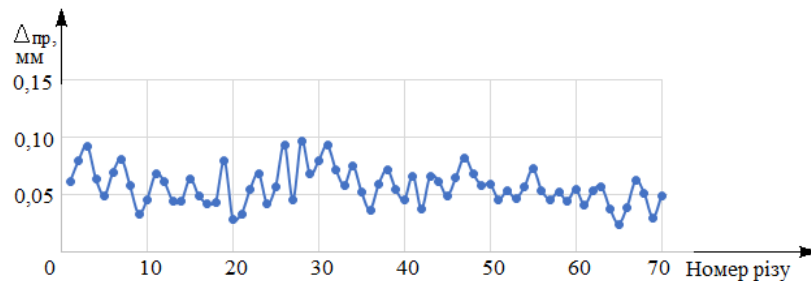
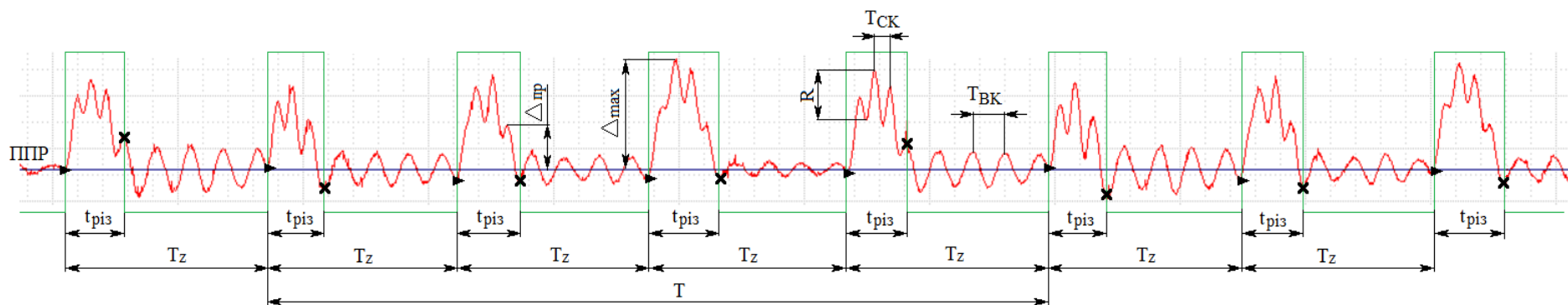


Рисунок 5.30- Графік змін відхилення від ППР першої хвилі супроводжуваних вільних коливань при зустрічному фрезеруванні з частотою варіювання швидкістю різання 3Гц та амплітудою 20%.

Варіювання швидкістю різання за рахунок зміни подачі та товщини шару, що зрізається, зменшує відхилення від ППР першої хвилі супроводжуваних вільних коливань та зменшує похибки обробленої поверхні і її шорсткість (при фрезеруванні з варіюванням швидкістю різання $R_a 8,5$ (4 клас), без варіювання швидкістю різання - $R_a 14,1$ (3клас)). При цьому свій вплив вносить і радіальне биття фрези.

При попутному кінцевому фрезеруванні чотиризубою фрезою без варіювання швидкістю різання отримано осцилограму коливань деталі, фрагмент якої наведено на рис. 5.31. На відміну від зустрічного кінцевого фрезерування, коли різання починається з мінімального шару, що зрізається, при попутному фрезеруванні різання починається з максимального шару. Товщина шару впливає на жорсткість технологічної системи «інструмент – деталь». Тому при попутному фрезеруванні період супроводжуваних вільних коливань менше, чим при зустрічному (при зустрічному $T_{СК}=1,2 \cdot 10^{-3}c$ ($f_{СК}=833Гц$), при попутному $T_{СК}=0,9 \cdot 10^{-3}c$ ($f_{СК}=1041Гц$)).



$T_{СК}$ – період вільних супроводжуваних коливань; $T_{ВК}$ – період вільних коливань деталі; $t_{різ}$ – час різання; T_z – період зубцевої частоти; T – період обертання фрези; R – розмах супроводжуваних вільних коливань; Δ_{max} – максимальне відхилення деталі; $\Delta_{пр}$ – відхилення від ППР останньої хвилі супроводжуваних вільних коливань.

Рис.5.31 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при попутному кінцевому фрезеруванні без варіювання швидкістю різання

Розмах супроводжуючих коливань при попутному фрезеруванні менше, чим при зустрічному (при зустрічному $R=0,083\text{мм}$ ($A=0,0415\text{мм}$), при попутному $R=0,056\text{мм}$ ($A=0,028\text{мм}$)), але в обох випадках амплітуда коливань у третій швидкісній зоні перевищує $0,02\text{мм}$.

На рис. 5.32 показана профілограма обробленої поверхні при попутному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання.



Рисунок 5.32 – Профілограма обробленої поверхні при попутному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання

Оброблена поверхня має хвилястий профіль, на якому висота хвилястості $W_z = 0,041\text{мм}$, крок хвилястості $S_w = 1,3\text{мм}$. Ці значення менші, ніж ті, що отримані після зустрічного фрезерування.

Формоутворююча западина, що залишається від поверхні різання при попутному фрезеруванні, залежить від відхилення від ППР останньої хвилі супроводжуючих коливань $\Delta_{\text{пр}}$, значення яких наведені в додатку Н.

На рис. 5.33 зображено графік змін величини відхилення від ППР останньої хвилі супроводжуючих коливань при попутному фрезеруванні без варіювання швидкості різання.

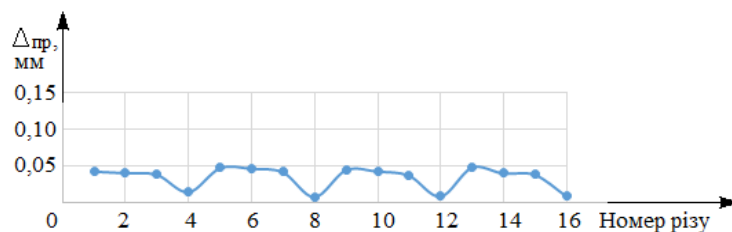


Рисунок 5.33 – Графік змін відхилення від ППР останньої хвилі супроводжуючих коливань при попутному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання

Шорсткість обробленої поверхні при попутному фрезеруванні без варіювання швидкістю різання $R_a 8,1$.

На рис. 5.34 наведено фрагмент осцилограми коливань деталі при попутному фрезеруванні з частотою варіювання швидкістю різання 3Гц та амплітудою 20%.

Зміна частоти обертання шпинделя та подачі при попутному кінцевому фрезеруванні відбувається згідно законів показаних на рис. 2.32 та рис.2.33. Період супроводжуючих вільних коливань при різанні $T_{СК}=0,9 \cdot 10^{-3} \text{с}$ ($f_{СК}=1041 \text{Гц}$), період вільних коливань деталі $T_{ВК}=2 \cdot 10^{-3} \text{с}$ ($f_{ВК}=488 \text{Гц}$). Період зубцевої частоти T_z на кожному різі відповідає діючій частоті обертання шпинделя.

Розмах супроводжуючих коливань R у порівнянні з фрезеруванням без варіювання швидкістю різання зменшився у 2 рази (без варіювання швидкістю різання $R=0,056 \text{мм}$ ($A=0,028 \text{мм}$), з варіюванням швидкістю різання $R=0,025 \text{мм}$ (амплітуда $A=0,0125 \text{мм}$)).

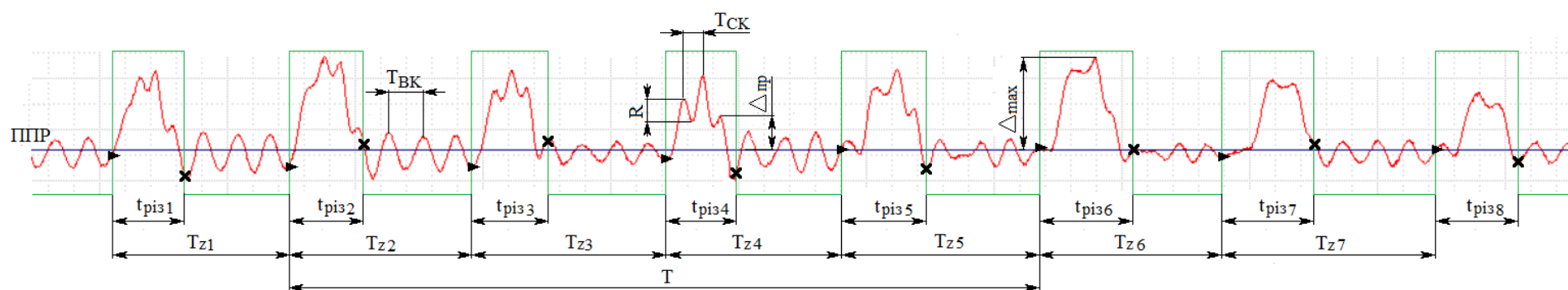


Рисунок 5.34 – Фрагмент осцилограми коливань деталі при попутному фрезеруванні з частотою варіювання швидкістю різання 3Гц та амплітудою 20%.

На рис.5.35 показано профілограму обробленої поверхні при попутному фрезеруванні з частотою варіювання швидкістю різання 3Гц та амплітудою 20%.



Рисунок 5.35 - Профілограма обробленої поверхні при попутному фрезеруванні з частотою варіювання швидкістю різання 3Гц та амплітудою 20%.

Крок та висота хвилястості у порівнянні з фрезеруванням без варіювання швидкості різання зменшилися у 2 рази (при фрезеруванні без варіювання $W_z=0,041\text{мм}$, $S_w=1,3\text{мм}$, при фрезеруванні з варіювання $W_z=0,021\text{мм}$, $S_w=0,7\text{мм}$). Шорсткість обробленої поверхні $R_a\ 6,5$ (4клас).

6 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Економічна ефективність при фрезеруванні тонкостінних деталей визначалась за забезпеченням якості обробленої поверхні. При обробці з варіюванням швидкістю різання твердосплавною кінцевою фрезою діаметром 16мм за рахунок зміни початкових умов виникнення коливань при фрезеруванні на обробленій поверхні хвилястість не утворюється. При фрезеруванні без варіювання швидкістю різання після першого проходу на обробленій поверхні утворюється хвилястість, яка зрізається на другому проході при меншій глибині різання, коли час різання недостатній для виникнення коливань. Данні щодо технологічного процесу оброблення деталі, стійкості інструменту наведені у таблиці 6.1. Програма випуску деталей складає 500 штук.

Таблиця 6.1 – Вихідні данні для оцінки ефективності

Метод фрезерування	Переходи	Час обробки, хв	Стійкість інструменту, хв	Вартість фрези, грн.
без варіювання	напівчистовий	60	240	2000
	чистовий	60		
з варіюванням	однократний	60	240	2000

6.1 Витрати на інструмент

Використання варіювання швидкістю різання дозволяє виконувати фрезерування без вібрацій, які впливають на стійкість інструменту, тому замість двох переходів, які виконуються при фрезеруванні без варіювання,

буде один. За формулою (6.1) визначаємо витрати на використання інструменту при різних умовах фрезерування [51]

$$S_{in} = \sum_{i=1}^{m_{оп}} \sum_{j=1}^{n_{in}} \frac{C_{inij} \cdot t_{штij} \cdot \eta_m}{T_{ij} \cdot (n_j + 1)}, \quad (6.1)$$

де C_{inij} - ціна інструменту j -го виду на i -ої операції, що визначається за каталогами підприємств, фірм-постачальників інструменту чи сайтах мережі Інтернет, грн./шт.;

$t_{штij}$ - штучний час роботи j -го інструменту на i -ій операції, хв;

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

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

n_{in} - номенклатура інструментів на i -ій операції;

n_j - число переточок інструменту j -го виду до повного зношування або кількість ріжучих граней інструменту (для пластин без задніх кутів необхідно враховувати переверт пластини).

$$S_{in1} = \frac{2000 \times (1,25 + 1,25) \times 0,8}{4} = 1000 \text{ грн.}$$

$$S_{in2} = \frac{2000 \times 1,25 \times 0,8}{4} = 500 \text{ грн}$$

Зменшення витрат C_{in} на інструмент визначаємо за формулою (6.2)

$$C_{in} = (S_{in1} - S_{in2}) \times N \quad (6.2)$$

$$C_{in} = (1000 - 500) \times 500 = 250\,000,00 \text{ грн}$$

6.2 Витрати на технологічну електроенергію

Витрати на електроенергію при фрезеруванні на верстаті з варіюванням швидкістю різання та без неї визначаємо за формулою (6.3):

$$S_e = \frac{N_B \cdot k_N \cdot k_q \cdot k_{od} \cdot k_w \cdot t_{штк}}{\eta \cdot k_B} \cdot C_e, \quad (6.3)$$

де N_B - встановлена потужність головного електродвигуна, кВт;

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

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

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

k_w - коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі заводу (прийняти рівним 1,08);

η - коефіцієнт корисної дії обладнання (початкові дані);

k_B - коефіцієнт виконання норм часу;

C_e - вартість 1 кВт×год електроенергії (тариф для підприємств становить 7,45 грн. за 1 кВт×год).

$$S_{e1} = \frac{18 \times 0,9 \times 0,7 \times 1 \times 1,08 \times 2,5}{1 \times 1} \times 7,45 = 228,10 \text{ грн}$$

$$S_{e2} = \frac{18 \times 0,9 \times 0,7 \times 1 \times 1,08 \times 1,25}{1 \times 1} \times 7,45 = 114,05 \text{ грн}$$

Зменшення витрат на електроенергію при використанні варіювання швидкістю різання визначаємо за формулою (6.4)

$$C_e = (S_{e1} - S_{e2}) \cdot N \quad (6.4)$$

Розраховуємо економію на електроенергії:

$$C_e = (228,10 - 114,05) \times 500 = 67025,00 \text{ грн}$$

Загальний економічний ефект

$$C_3 = C_{ін} + C_e \quad (6.5)$$

$$C_3 = 250000,00 + 67025,00 = 317\,025 \text{ грн.}$$

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Оскільки тема дипломного проекту «Дослідження впливу варіювання швидкістю різання на коливання при кінцевому фрезеруванні», роботи проводились на фрезерному верстаті у «Лабораторії динамічних досліджень процесів різання» кафедри «Технологія машинобудування» НУ «Запорізька політехніка».

На підставі аналізу роботи існуючого обладнання та технологічних процесів відповідно до ДСТУ 7239:2011 «ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація» [52] виявлено такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які здатні травмувати або пошкодити здоров'я працівників та завдати шкоди навколишньому середовищу:

- ураження електрикою, у зв'язку з невиконанням правил техніки безпеки під час використання електроустаткування, відсутність заземлення;
- механічні травми: через пошкодження шкірного покриву під час закріплення заготовок;
- кісткові та м'язові порушення у зв'язку з тривалим навантаженням, що призводить до втоми, погіршення координації руху;
- санітарно-гігієнічні причини що пов'язані з незадовільним освітленням робочого місця при несправності освітлювальних приладів, зорова втома внаслідок пульсації світлового потоку від ламп денного світла.
- незадовільні параметри мікроклімату робочого місця у зв'язку з відсутністю центрального опалення.

7.1 Заходи з охорони праці

При роботі з «тонкостінними деталями» на стенді для дослідження динамічних процесів при фрезеруванні, який встановлюється на робочий стіл фрезерного верстату, заготовкою з пазом та пристроєм для дослідження коливань при точінні на токарному верстаті безпечне виконання робіт забезпечується правильним вибором технологічних рухів, конструктивних схем, матеріалів та робочих процесів, що відповідає ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпека машин. Електроустаткування машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT), правилам охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці) [53, 54].

До того ж безпека роботи на верстатах забезпечується дотриманням наступних правил:

- використовувати огороження зони різання;
- використовувати інструменти, які за своїми фізичними та механічними властивостями забезпечують безпечну обробку деталі;
- використовувати захисні окуляри;
- носити головний убір, щоб волосся не заважало;
- не одягати захисні рукавиці.

За ступенем електробезпеки, згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ-2017) приміщення лабораторії відноситься до другої категорії без підвищеної небезпеки.

Відповідно до правил роботи з електроустановками для попередження впливу електричного струму та напруги на людину все електричне обладнання має заземлення, яке потрібно перевіряти раз на 6 міс. Електромережі в приміщенні лабораторії прокладені в захисних коробах. При цьому проводиться

перевірка їх цілісності зовнішнім оглядом. При роботі верстата на холостому ході вимірюють опір ізоляції, перевіряють справність ланцюга заземлення, щоб уникнути накопичення на ньому зарядів статичної електрики, розряд якого може дати іскру і становити небезпеку для працюючого, і можливість пожежі та вибуху. Заземлення та захисні засоби безпеки електроустаткування відповідають вимогам (ПУЕ-2017), опір захисного заземлення не перевищує 4 Ом для обладнання напругою до 1000В [55].

Плануванням робочого середовища передбачено місця для тари із заготовками, стелажі для зберігання технологічної документації та інструменту.

При розробці планування передбачено ширину проходів, що забезпечують вільний доступ до всіх робочих місць та є шляхами евакуації співробітників лабораторії на випадок надзвичайної ситуації.

Площа лабораторії передбачає виконання вимог мінімального обсягу 15 м² на одне обладнання та мінімальні норми виробничої площі 4,5 м² на одного робітника та відповідає вимогам ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення». Передбачено місця для утилізації та поховання промислових відходів [56].

Захисні заходи безпеки електроустановок виконані відповідно до вимог (ПУЕ-2017). Електричне обладнання за способом захисту людей від ураження струмом встановлено як клас I, оскільки має подвійну ізоляцію, елемент для заземлення та провід для з'єднання до джерела живлення, що має заземлюючу жилу та вилку із заземлюючим контактом.

7.2 Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

Відповідно до наказу Міністерства охорони здоров'я України 06.05.2014 р. за № 472/25249 (далі – «Гігієнічна класифікація праці») за

територія санітарно-захисної зони лабораторії складає 100 м, що відповідає санітарним нормам.

Метеорологічні умови у робочому приміщенні за ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [57, 58], повинні забезпечувати в холодний період оптимальні норми температури повітря 18-20°C, відносну вологість 60-40% і швидкість повітря 0,3 м/с. У теплий період температура повітря повинна становити 21-23°C, відносна вологість 60-40% та швидкість повітря 0,2 м/с. Для забезпечення заданих параметрів встановлена притяжна вентиляція, обігрів реалізовано через електричні обігрівачі, використовуються сухі рушники та вологі серветки.

Відповідно до ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони підлягає систематичному контролю для запобігання можливості перевищення гранично допустимих концентрацій. У виробничих приміщеннях фактична концентрація: пилу стали до 2,10 мг/м³, парів олії до 2,3 мг/м³, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам [57].

Крім цього для попередження травм особовим складом лабораторії обов'язковим є дотримання посадових інструкцій та інструкцій на робочому місці.

ВИСНОВКИ

Отримані результати дипломного проєкту показують, що сучасні верстати з числовим програмним управлінням, які оснащені стійкою ЧПУ фірми Siemens Sinumerik 840D, дозволяють здійснювати процес різання металу в умовах варіювання швидкістю різання та подачею, використовуючи вбудовані можливості програмування управляючої програми без застосування додаткового оснащення.

Амплітудно-частотні характеристики приводів верстатів зі стійкою ЧПУ Sinumerik 840D мають допустимий діапазон зміни параметрів варіювання, який може бути реалізований на практиці відповідно до заданого математичного закону управління параметрами руху.

Встановлено, що при кінцевому фрезеруванні через малий час різання неможливе виникнення сталих незатухаючих автоколивань. На початку різання виникають супроводжуючі вільні коливання технологічної системи «інструмент – деталь». Саме хвилі супроводжуючих коливань впливають на формоутворення обробленої поверхні, а їх амплітуда впливає на стійкість інструменту.

При попутному та зустрічному фрезеруванні гострозаточеною фрезою у третій швидкісній зоні коливань амплітуди супроводжуючих вільних коливань мають значення, більше 0,02мм, що несприятливо для стійкості різального інструменту. Наявність супроводжуючих коливань є причиною виникнення хвилястості на обробленій поверхні, що характеризується кроком та висотою.

Супроводжуючі коливання технологічної системи є вільними, амплітуда яких залежить від таких початкових умов, як початкова швидкість та положення початкової точки коливань. Використання варіювання швидкістю різання при кінцевому фрезеруванні впливає на обидві ці умови. Варіювання змінює швидкість різання від максимального значення до мінімального в межах заданої амплітуди відносно номінального значення та з заданою

частотою. Дослідження виконувались при частоті варіювання 3Гц та амплітудою 20%.

Фрезерування з варіюванням швидкістю різання покращує якість обробленої поверхні та зменшує шорсткість на ній. Це підтверджують дані, що наведені за результатами досліджень у зведеній таблиці.

Зведена таблиця

Контрольовані параметри	Напрямок подачі			
	Зустрічне		Попутне	
	Без варіювання швидкості різання	З варіюванням швидкістю різання	Без варіювання швидкості різання	З варіюванням швидкістю різання
S_w , мм	2,56	1,5	1,3	0,7
W_z , мм	0,064	0,028	0,041	0,021
R_a , мкм	14,1	8,5	8,1	6,5
R/A , мм	0,083/0,0415	0,034/0,017	0,056/0,028	0,025/0,0125

Використання варіювання швидкістю різання при кінцевому фрезеруванні дозволяє без зменшення частоти обертання шпинделя підвищити якість поверхні, зменшити шорсткість, підвищити стійкість інструменту

Розрахований загальний економічний ефект складає 317 025грн.

Розглянуто заходи безпечної роботи персоналу на металорізальних верстатах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Афонина Н. А. Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания: дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Афонина. — Тула : 2004. — 182 с.
2. Кудинов В. А. Теория вибраций при резании (трении) / В. А. Кудинов // «Станки и инструмент». 1955. №10. — С. 631–633.
3. Шнепс В. А. Экспериментальное исследование влияния синусоидального изменения скорости на устойчивость резания / В. А. Шнепс // Вопросы динамики и прочности. 1970. — С. 123–130.
4. Inamura T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed / T. Inamura, T. Sata // Annals of CIRP. — 1974. — Vol. 23. — P. 119–120.
5. Jayaram S. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining / S. Jayaram, S. G. Kapoor, R. E. DeVor // ASME Journal of Engineering for Industry. — 2000. — Vol. 122. — P. 391–397.
6. Jemielniak K. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method / K. Jemielniak, A. Widota // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 1984. — Vol. 24. — P. 207–214.
7. Sexton J. S. A stability analysis of single point machining with varying spindle speed / J. S. Sexton, R. D. Milne, B. J. Stone // Applied Mathematical Modelling. — 1977. — Vol. 19. — P. 310–318.
8. Sexton J. S. An investigation of the transient effects during variable speed cutting / J. S. Sexton, B. J. Stone // Journal of Mechanical Engineering Science. — 1980. — Vol. 22. — P. 107–118.
9. Takemura T. Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed / T. Takemura, T. Kitamura, T. Hoshi // Annals of CIRP. — 1974.
10. Yilmaz A. Machine tool chatter suppression by multi-level random spindle speed variation / A. Yilmaz, E. AL-Regib, J. Ni // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2002. — Vol. 124, No. 2. — P. 208–216.

11. Special tension clamp for milling of blade type parts / D. ZHANG, J. WANG, B. WU[et al.]; assigned 13. No. 4. P. 168–182.
12. Hoshi T. Study of practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control / T. Hoshi // *Ann. CIRP*. — 1977. — Vol. 25. — P. 175.
13. Ismail F. Active suppression of chatter in peripheral milling. part. 1. a statistical indicator to evaluate the spindle speed modulation method / F. Ismail, E. G. Kubica // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 1995. — Vol. 10. — P. 299–310.
14. Radulescu R. An investigation of variable spindle speed face milling for tool-work structures with complex dynamics, part 1: simulation results; part2: physical explanation; part 3 / R. Radulescu, S. G. Kapoor, R. E. DeVor // *Journal of manufacturing science and engineering*. — 1997. — Vol. 119. — P. 266–283.
15. Sastry S. Floquet theory based approach for stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S. G. Kapoor, R. E. DeVor // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. — 2001. — Vol. 124, No. 1. — P. 10–17.
16. Smith S. Stabilizing chatter by automatic spindle speed regulation / S. Smith, J. Tlustý // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. — 1992.
17. Segalman D. J. Suppression of regenerative chatter via impedance modulation / D. J. Segalman, E. A. Butcher // *JVC/Journal of Vibration and Control*. — 2000. No. 1. P. 288–326.
18. Albertelli P. Spindle speed variation in turning: technological effectiveness and applicability to real industrial cases / P. Albertelli, S. Musletti, M. Leonesio[et al.] // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2012. No. 3. P. 118–136.
19. Brecher C. Simulative parameterization of dead time variable rotation speed behavior to improve process stability in high performance cutting / C. Brecher, R. Hermes, A. Eppler, S. Bäumlér. — 2012. No. 5. P. 88–116.
20. Yang F. Chatter suppression with multiple time-varying parameters in turning / F. Yang, B. Zhang, J. Yu // *Journal of Materials Processing Technology*.

— 2003. No. 1. P. 108–116.

21. Wu D. Application of active disturbance rejection control to variable spindle speed noncircular turning process / D. Wu, T. Zhao, K. Chen, X. Wang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 2009. P. 208–216.

22. Mei Z. Active chatter suppression by on-line variation of the rake and clearance angles in turning- principles and experimental investigations / Z. Mei, S. Yang, H. Shi[et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 1994. Vol. 44, No. 2. — P. 107–130.

23. Tsao T.-C. New approach to stability analysis of variable speed machining system / T.-C. Tsao, M. W. McCarthy, S. G. Kapoor // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. — 1993. Vol. 88, No. 3. — P. 96–121.

24. Munoa J. Chatter suppression techniques in metal cutting / J. Munoa, X. Beudaert, Z. Dombvari[et al.] // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. — 2016. Vol. 122, No. 6. — P. 147–168.

25. Bediaga I. Application of continuous spindle speed variation for chatter avoidance in roughing milling / I. Bediaga, M. Zatarain, J. Muñoa, R. Lizarralde // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. — 2011. Vol. 11, No. 2. — P. 56–71.

26. Al-Regib E. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression / E. Al-Regib, J. Ni, S. H. Lee // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 2003. Vol. 43, No. 4. — P. 217–231.

27. Seguy S. On the stability of high-speed milling with spindle speed variation / S. Seguy, T. Insperger, L. Arnaud[et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2010. — Vol. 48, No. 9. — P. 883–895.

28. Altintas Y. In-process detection and suppression of chatter in milling / Y. Altintas, P. K. Chan // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 1992. Vol. 34, No.2. — P. 65–81.

29. Zatarain M. Stability of milling processes with continuous spindle speed variation: analysis in the frequency and time domains, and experimental correlation / M. Zatarain, I. Bediaga, J. Munoa, R. Lizarralde // *CIRP Annals-Manufacturing*

Technology. — 2008. — Vol. 57, No. 1. — P. 379–384.

30. Insperger T. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay / T. Insperger, G. Stépán // International Journal for Numerical Methods in Engineering. — 2004. — Vol. 61, No. 1. — P. 117–141.

31. Нерубай М. С. Физико-механические методы обработки / М. С. Нерубай. — М.: Машиностроение, 1979. — 92 с.

32 Ахметшин Н. И. Вибрационное резание металлов / Н. И. Ахметшин, Э. М. Гоц, Н. Ф. Родиков. — Л. : Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1987. — 80 с.

33. Stoferle T. Vermeiden von ratterschwingungen durch periodische drehzahländerung / T. Stoferle, H. Grab // Werkstatt und Betrieb. — 1972. — Vol. 105. — P. 727–730.

34. Петрашина Л. Н. Интенсивность автоколебаний технологической системы металлорежущих станков при низкочастотном периодическом воздействии: дис. ... канд. техн. наук / Л. Н. Петрашина. — Ленинград. — 322с.

35. Zhang H. Machining chatter suppression by means of spindle speed variation, part 1, numerical simulation; part 2, experimental investigation / H. Zhang, J. Ni, H. Shi // Proceedings of the First S. M. Wu Symposium on Manufacturing Science. — 1994. — P. 161–175.

36 Эльясберг М. Е. Повышение устойчивости автоколебательной системы станка при воздействии периодического низкочастотного изменения скорости резания / М. Е. Эльясберг, М. Г. Биндер // Станки и инструмент. — 1989. — №. 10. — С. 19–21.

37. Шадский Г. В. Адаптивный способ повышения виброустойчивости токарного станка / Г. В. Шадский, С. Ф. Золотых // СТИН. — 2001. — №. 9. — С. 18–22.

38. Lin S. C. The effects of variable speed cutting on vibration control in face milling / S. C. Lin, R. E. DeVor, S. G. Kapoor // ASME Journal of Engineering for Industry. — 1990. — Vol. 122, No. 2. — P. 1–11.

39. Radulescu R. A general cutting process model for high speed machining dynamic and thermal considerations : phd thesis / R. Radulescu. — Urbana-Champaign : University of Illinois, 1993.
40. Sastry S. Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, G. E. Dullerud // ASME Journal of Engineering for Industry. — 2001. — Vol. 123. — P. 753–756.
41. Свинин В. М. Гашение автоколебаний при фрезеровании путем периодического изменения скорости резания / В. М. Свинин. — 1991.
42. Бондарь П. А. Исследование импульсного вариатора в приводе токарного станка при вибрационном резании : дис. ... канд. техн. / П. А. Бондарь. — Одесса, 1981. — 232 с.
43. Кропп А. Е. Приводы машин с импульсными вариаторами / А. Е. Кропп. — М. : Машиностроение, 1988. — 144 с.
44. Liao Y. S. A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control / Y. S. Liao, Y. C. Young // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 1996.
45. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. — М. : Высшая школа, 1974. — 587 с.
46. Свинин В. М. Исследование регенеративных колебаний при токарной обработке нежестких валов / В. М. Свинин, Е. А. Пешкова, Д. В. Лобанов, В. Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. — 2016. — No. 3. — P. 47–52.
47. Беляєва А. Ю. Розробка принципів раціонального проектування пружних елементів різцетримачів для точіння з дробленням стружки / А. Ю. Беляєва. — Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2009. — 181 с.
48. Внуков Ю.Н. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей. Монография / Ю.Н. Внуков, С.И.Дядя, Е.Б.Козлова, В.А.Логоминов, Н.Н.Черновол. —Запорожье: ЗНТУ, 2017. -208с.

49. Пристрій для дослідження регенеративних автоколивань при точінні. Патент України UA 122686 Україна, МПК (2017.01) B23Q 17/12 заявник та власник патенту ЗНТУ . №u 201706988; заявл. 03.07.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл.№ 2. Дядя С.І., Кучугуров М.В., Внуков Ю.М., Зубарєв А.Є., Черновол Н.М., Кришталь В.О.

50. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. / Я.Г. Пановко. -Л: Машиностроение, 1976. - 320с.

51. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ для дипломного проектування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання

52. ДСТУ 7239:2011 «ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація».

53. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безопасность машин. Электрооборудование машин. Часть 1. Общие требования (EN 60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT)

54. НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці)

55 . Правила улаштування електроустановок [Текст] : (ПУЕ-2017). – На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21. – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. – (Правила)

56. ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення»

57. ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»

58. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування»

ДОДАТОК А
ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО
ВАРІЮВАННЯ

N001 S400 M3;	Завдання та вмикання обертів шпинделя
N002 \$AC_PARAM[1] = 50;	Амплітуда варіювання
N003 \$AC_PARAM[2] = 1;	Частота варіювання
N004 \$AC_TIMER[1] = 0;	Активація таймеру 1
N005 IDS=1 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 + \$AC_PARAM[1] * SIN(360 * \$AC_PARAM[2] * \$AC_TIMER[1]);	Синхронна дія №1 – завдання процентівки шпинделя
N006 G1 G95 Z100 F0.2;	Повздовжнє переміщення стола
N007 CANCEL(1);	Видалення синхронної дії №1
N008 G0 Z0;	Прискорене повернення стола у вихідне положення
N009 \$AC_TIMER[1] = -1;	Відключення таймеру
N010 M5 M2;	Зупинка шпинделя \ кінець програми

ДОДАТОК Б

ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО АМПЛІТУДНОГО ВАРІЮВАННЯ

N001 S400 M3; Завдання та вмикання обертів шпинделя

N002 \$AC_PARAM[1] = 30; Номінальна амплітуда варіювання

N003 \$AC_PARAM[2] = 20; Амплітуда зміни амплітуди варіювання

N004 \$AC_PARAM[3] = 0.5; Частота зміни амплітуди варіювання

N005 \$AC_PARAM[4] = 0; Фаза зміни амплітуди варіювання

N006 \$AC_PARAM[5] = 5; Частота варіювання

N007 \$AC_PARAM[6] = 0; Фаза варіювання

N008 \$AC_TIMER[1] = 0; Активація таймера 1

**N009 IDS=1 DO \$AC_PARAM[7] = \$AC_PARAM[1] + \$AC_PARAM[2] *
SIN(360 * \$AC_PARAM[3] * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[4]);**
Синхронна дія 1 – розрахунок фактичної амплітуди варіювання

**N010 IDS=2 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 + \$AC_PARAM[7] * SIN(360 *
\$AC_PARAM_5 * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[6]);** Синхронна дія 2 –
завдання процентовки шпинделя

N011 G1 G95 Z20 F0.1; Повздовжнє переміщення стола

N012 CANCEL(1, 2); Видалення синхронних дій №1, 2

N013 \$AC_TIMER[1] = -1; Вимкнення таймера 1

N014 G0 Z0; Прискорене повернення стола у вихідне положення

N015 M5 M2; Зупинка шпинделя \ кінець програми

ДОДАТОК В

ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО ВАРІЮВАННЯ

N001 S400 M3; Завдання та вмикання обертів шпинделя

N002 \$AC_PARAM[1] = 50; Амплітуда варіювання

N003 \$AC_PARAM[2] = 6; Номінальна частота варіювання

N004 \$AC_PARAM[3] = 3.6; Амплітуда зміни частоти варіювання

N005 \$AC_PARAM[4] = 0.7; Частота зміни частоти варіювання

N006 \$AC_PARAM[5] = 0; Фаза зміни частоти варіювання

N007 \$AC_PARAM[6] = 0; Фаза варіювання

N008 \$AC_PARAM[7] = 3.14159265358979; математична константа

N009 \$AC_TIMER[1] = 0; Активація таймера 1

N010 IDS=1 DO \$AC_PARAM[11] = 360 * \$AC_PARAM[2] * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[3] / \$AC_PARAM[4] * SIN(360 * \$AC_PARAM[4] * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[5]) * 360 / (2 * \$AC_PARAM[7]) + \$AC_PARAM[6]; Синхронна дія №1 – розрахунок поточної сумарної фази варіювання

N011 IDS=2 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 + \$AC_PARAM[1] * SIN(\$AC_PARAM[11]); Синхронна дія №2 – завдання процентовки шпинделя

N012 G1 G95 Z20 F0.1; Повздовжнє переміщення стола

N013 CANCEL(1, 2); Видалення синхронних дій №1, 2

N014 \$AC_TIMER[1] = -1; Вимкнення таймера 1

N015 G0 Z0; Прискорене повернення стола у вихідне положення

N016 M5 M2; Зупинка шпинделя \ кінець програми

ДОДАТОК Г
ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО
АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОГО ВАРПЮВАННЯ

N001 S400 M3	Завдання та вмикання обертів шпинделя
N002 \$AC_PARAM[1] = 30;	Номінальна амплітуда варіювання
N003 \$AC_PARAM[2] = 20;	Амплітуда зміни амплітуди варіювання
N004 \$AC_PARAM[3] = 0.5;	Частота зміни амплітуди варіювання
N005 \$AC_PARAM[4] = 0;	Фаза зміни амплітуди варіювання
N006 \$AC_PARAM[5] = 6;	Номінальна частота варіювання
N007 \$AC_PARAM[6] = 3;	Амплітуда зміни частоти варіювання
N008 \$AC_PARAM[7] = 1;	Частота зміни частоти варіювання
N009 \$AC_PARAM[8] = 0;	Фаза зміни частоти варіювання
N010 \$AC_PARAM[9] = 0;	Фаза варіювання
N011 \$AC_PARAM[10] = 3.14159265358979;	математична константа
N012 \$AC_TIMER[1] = 0;	Активація таймера 1
N013 IDS=1 DO \$AC_PARAM[11] = 360 * \$AC_PARAM[5] * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[6] / \$AC_PARAM[7] * SIN(360 * \$AC_PARAM[7] * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[8]) * 360 / (2 * \$AC_PARAM[10]) + \$AC_PARAM[9];	Синхронна дія№1 – розрахунок сумарної фази варіювання
N014 IDS=2 DO \$AC_PARAM[12] = \$AC_PARAM[1] + \$AC_PARAM[2] * SIN(360 * \$AC_PARAM[3] * \$AC_TIMER[1] + \$AC_PARAM[4]);	Синхронна дія№2 – розрахунок фактичної амплітуди варіювання
N015 IDS=3 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 + \$AC_PARAM[12] * SIN(\$AC_PARAM[11]);	Синхронна дія№3 – завдання процентовки шпинделя
N016 G1 G95 Z20 F0.1;	Повздовжнє переміщення стола
N017 CANCEL(1, 2, 3);	Видалення синхронних дій №1, 2, 3

N018 \$AC_TIMER[1] = -1; Вимкнення таймера 1
N019 G0 Z0; Прискорене повернення стола у вихідне положення
N020 M5 M2; Зупинка шпинделя\кінець програми

ДОДАТОК Д

ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО АСИМЕТРИЧНОГО ВАРІЮВАННЯ

N001 S400 M3; Завдання та вмикання обертів шпинделя

N002 \$AC_PARAM[1] = 20; Амплітуда варіювання

N003 \$AC_PARAM[2] = 2; Частота варіювання

N004 \$AC_PARAM[3] = 0.8; Коефіцієнт асиметричності

N005 \$AC_PARAM[4] = 1 / \$AC_PARAM[2]; Середній період варіювання

N006 \$AC_PARAM[5] = \$AC_PARAM[4] * \$AC_PARAM[3] * 2; Період зменшення швидкості різання шпинделя

N007 \$AC_PARAM[6] = \$AC_PARAM[4] * (1 - \$AC_PARAM[3]) * 2;
Період збільшення швидкості різання шпинделя

N008 \$AC_PARAM[7] = 1 / \$AC_PARAM[5]; Частота зниження швидкості різання шпинделя

N009 \$AC_PARAM[8] = 1 / \$AC_PARAM[6]; Частота збільшення швидкості обертання шпинделя

N010 \$AC_TIMER[1] = \$AC_PARAM[5] / 2 + \$AC_PARAM[6] / 4;
Активація таймера 1 и присвоєння начального значення

N011 IDS=1 DO \$AC_PARAM[9] = (\$AC_TIMER[1] MOD \$AC_PARAM[4]); Синхронна дія№1 – розрахунок поточного часу варіювання

N012 IDS=2 WHENEVER (\$AC_PARAM[9] <= (\$AC_PARAM[5] / 2)) DO UNLOCK(4) LOCK(5); Синхронна дія№2 – включення гальмування шпинделя

N013 IDS=3 WHENEVER (\$AC_PARAM[9] > (\$AC_PARAM[5] / 2)) DO LOCK(4) UNLOCK(5); Синхронна дія№3 – включення розгону шпинделя

N014 IDS=4 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 + \$AC_PARAM[1] * SIN(360 * \$AC_PARAM[7] * \$AC_PARAM[9] + 90); Синхронна дія №4 – завдання

процентовки шпинделя при зниженні швидкості

N015 IDS=5 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 + \$AC_PARAM[1] * SIN(360 * \$AC_PARAM[8] * (\$AC_PARAM[4] - \$AC_PARAM[9]) + 90); Синхронна

дія №5 – завдання процентовки шпинделя при збільшенні швидкості

N016 G1 G95 X10 F0.1; Повздовжнє переміщення стола

N017 CANCEL(1, 2, 3, 4, 5); Видалення синхронних дій №1, 2, 3, 4, 5

N018 \$AC_TIMER[1] = -1; Вимкнення таймера 1

N019 G0 X0; Прискорене повернення стола у вихідне положення

N020 M5 M2 Зупинка шпинделя\кінець програми

ДОДАТК Е

ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СТОХАСТИЧНОГО АМПЛІТУДНОГО ВАРІЮВАННЯ

N001 S500 M3; Завдання та вмикання обертів шпинделя

N002 \$AC_PARAM[1] = 50; Максимальна амплітуда варіювання

N003 \$AC_PARAM[2] = 20; Період варіювання

N004 \$AC_PARAM[3] = 0; Лічильник

**N005 \$AC_PARAM[4] = \$A_DAY * \$A_HOUR * \$A_MINUTE *
\$A_SECOND * \$A_MSECOND;** Розрахунок перемінної часу

N006 \$AC_PARAM[5] = 0; Число стохастичної послідовності

N007 \$AC_PARAM[6] = \$AC_PARAM[1]; Фактичне значення поточної
зміни процентовки шпинделя

N008 IDS=1 DO \$AC_PARAM[3] = \$AC_PARAM[3] + 1; Синхронна дія№1
– інкрементація лічильника

**N009 IDS=2 EVERY \$AC_PARAM[3] > (\$AC_PARAM[2]) DO
\$AC_PARAM[3] = 0 UNLOCK(3, 4, 5, 6);** Синхронна дія№2 – перевірка
умов перемикавання частоти обертання шпинделя

**N010 IDS=3 DO \$AC_PARAM[5] = (16807 * \$AC_PARAM[4]) MOD
2147483647;** Синхронна дія№3 – Розрахунок поточного значення стохастичної
послідовності чисел

**N011 IDS=4 DO \$AC_PARAM[6] = 2 * \$AC_PARAM[1] * \$AC_PARAM[5] /
2147483647;** Синхронна дія№4 – розрахунок фактичного значення
поточної зміни процентовки шпинделя

N012 IDS=5 DO \$AC_PARAM[4] = \$AC_PARAM[5]; Синхронна
дія№5 – запис останнього числа стохастичної послідовності чисел

N013 IDS=6 DO LOCK(3, 4, 5, 6); Синхронна дія№6 – Вимкнення зміни
процентовки шпинделя

N014 IDS=7 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 - \$AC_PARAM[1] + \$AC_PARAM[6];

Синхронна дія №7 – завдання процентовки шпинделя

N015 G1 G95 Z40 F0.15; Повздовжнє переміщення стола

N016 CANCEL(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7); Видалення синхронних дій №1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

N017 G0 Z0; Прискорене повернення стола у вихідне положення

N018 M5 M2; Зупинка шпинделя\кінець програми

ДОДАТОК Ж

ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СТОХАСТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО ВАРІЮВАННЯ

N001 S500 M3; Завдання та вмикання обертів шпинделя

N002 \$AC_PARAM[1] = 50; Максимальна амплітуда варіювання

N003 \$AC_PARAM[2] = 5; Мінімальний період варіювання

N004 \$AC_PARAM[3] = 35; Допуск періоду варіювання

N005 \$AC_PARAM[4] = \$AC_PARAM[2]; Поточний період варіювання

N006 \$AC_PARAM[5] = 0; Лічильник

**N007 \$AC_PARAM[6] = \$A_DAY * \$A_HOUR * \$A_MINUTE *
\$A_SECOND * \$A_MSECOND;** Розрахунок перемінної часу

N008 \$AC_PARAM[7] = 0; Число стохастичної послідовності

N009 \$AC_PARAM[8] = 100 + \$AC_PARAM[1]; Поточна процентовка шпинделя

N010 IDS=1 DO \$AC_PARAM[5] = \$AC_PARAM[5] + 1; Синхронна дія№1 – Інкрементація лічильника

**N011 IDS=2 WHENEVER \$AC_PARAM[5] > (\$AC_PARAM[4]) DO
\$AC_PARAM[5] = 0 UNLOCK(3, 4, 5, 6, 7, 8);** Синхронна дія№2 – Перерахунок параметрів варіювання

**N012 IDS=3 DO \$AC_PARAM[7] = (16807 * \$AC_PARAM[6]) MOD
2147483647;** Синхронна дія№3 – Розрахунок поточного числа стохастичної послідовності

**N013 IDS=4 DO \$AC_PARAM[4] = \$AC_PARAM[2] + \$AC_PARAM[3] *
\$AC_PARAM[7] / 2147483647;** Синхронна дія№4 – Розрахунок поточного періоду варіювання

N014 IDS=5 DO \$AC_PARAM[6] = \$AC_PARAM[7]; Синхронна дія№5 – запис числа послідовності

N015 IDS=6 WHENEVER \$AC_PARAM[8] > 100 DO \$AC_PARAM[8] = 100
- \$AC_PARAM[1] LOCK(7); Синхронна дія№6 – розрахунок мінімального значення процентовки шпинделя, блокування синхронної дії №7

N016 IDS=7 WHENEVER \$AC_PARAM[8] < 100 DO \$AC_PARAM[8] = 100
+ \$AC_PARAM[1] LOCK(6) Синхронна дія№7 – розрахунок максимального значення процентовки шпинделя, блокування синхронної дії №6

N017 IDS=8 DO LOCK(3, 4, 5, 6, 7, 8); Синхронна дія№8 – Вимкнення зміни процентовки шпинделя

N018 IDS=9 DO \$AA_OVR[SP1] = \$AC_PARAM[8]; Синхронна дія№9 – завдання процентовки шпинделя

N019 G1 G95 Z40 F0.15; Повздовжнє переміщення стола

N020 CANCEL(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9); Видалення синхронних дій №1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

N021 G0 Z0; Прискорене повернення стола у вихідне положення

N022 M5 M2; Зупинка шпинделя\кінець програми

ДОДАТОК К

ПРОГРАМНИЙ КОД РЕАЛІЗАЦІЇ СТОХАСТИЧНОГО АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОГО ВАРІЮВАННЯ

N001 S500 M3; Завдання та вмикання обертів шпинделя

N002 \$AC_PARAM[1] = 50; Максимальна амплітуда варіювання

N003 \$AC_PARAM[2] = 2; Мінімальний період варіювання

N004 \$AC_PARAM[3] = 20; Допуск на період варіювання

N005 \$AC_PARAM[4] = \$AC_PARAM[2]; Поточний період варіювання

N006 \$AC_PARAM[5] = 0; Лічильник

**N007 \$AC_PARAM[6] = \$A_DAY * \$A_HOUR * \$A_MINUTE *
\$A_SECOND * \$A_MSECOND;** Розрахунок системної
перемінної часу періода варіювання

N008 \$AC_PARAM[7] = 0; Число стохастичної послідовності
розрахунку періода варіювання

**N009 \$AC_PARAM[8] = \$A_HOUR * \$A_MINUTE * \$A_SECOND *
\$A_MSECOND;** Розрахунок системної перемінної часу
амплітуди варіювання

N010 \$AC_PARAM[9] = 0; Число стохастичної послідовності
розрахунку амплітуди варіювання

N011 \$AC_PARAM[10] = \$AC_PARAM[1]; Параметр процентовки шпинделя

N012 IDS=1 DO \$AC_PARAM[5] = \$AC_PARAM[5] + 1; Синхронна
дія№1 – Інкрементація лічильника

**N013 IDS=2 EVERY \$AC_PARAM[5] > (\$AC_PARAM[4]) DO
\$AC_PARAM[5] = 0 UNLOCK(3, 4, 5, 6, 7, 8, 9);** Синхронна дія№2 –
перевірка умов перемикавання частоти обертання шпинделя

**N014 IDS=3 DO \$AC_PARAM[7] = (16807 * \$AC_PARAM[6]) MOD
2147483647;** Синхронна дія№3 – Розрахунок поточного значення
стохастичної послідовності періода варіювання

N015 IDS=4 DO \$AC_PARAM[4] = \$AC_PARAM[2] + \$AC_PARAM[3] * \$AC_PARAM[7] / 2147483647; Синхронна дія№4 – розрахунок поточного періоду варіювання

N016 IDS=5 DO \$AC_PARAM[6] = \$AC_PARAM[7]; Синхронна дія№5 – Запис числа послідовності

N017 IDS=6 DO \$AC_PARAM[9] = (16807 * \$AC_PARAM[8]) MOD 2147483647; Синхронна дія№6 - Розрахунок поточного значення стохастичної послідовності амплітуди варіювання

N018 IDS=7 DO \$AC_PARAM[10] = 2 * \$AC_PARAM[1] * \$AC_PARAM[9] / 2147483647; Синхронна дія№7 - розрахунок поточної амплітуди варіювання

N019 IDS=8 DO \$AC_PARAM[8] = \$AC_PARAM[9]; Синхронна дія№8 – Запис числа послідовності

N020 IDS=9 DO LOCK(3, 4, 5, 6, 7, 8, 9); Синхронна дія№9 – вимкнення змін процентовки шпинделя

N021 IDS=10 DO \$AA_OVR[SP1] = 100 - \$AC_PARAM[1] + \$AC_PARAM[10]; Синхронна дія№10 – завдання процентовки шпинделя

N022 G1 G95 Z40 F0.15; Повздовжнє переміщення стола

N023 CANCEL(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10); Видалення синхронних дій №1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

N024 G0 Z0; Прискорене повернення стола у вихідне положення

N025 M5 M2; Зупинка шпинделя\кінець програми

ДОДАТОК Л

Таблиця Л - Відхилення першої хвилі супроводжуючих вільних коливань від ППР при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 1200 об/хв без варіювання швидкістю різання

Номер різу	Відхилення першої хвилі супроводжуючих вільних коливань $\Delta_{пр}$, мм
1	2
1	0,127
2	0,111
3	0,093
4	0,109
5	0,125
6	0,098
7	0,085
8	0,098
9	0,112
10	0,084
11	0,052
12	0,071
13	0,078
14	0,066
15	0,040
16	0,056
17	0,059
18	0,062
19	0,038
20	0,024
21	0,038
22	0,044
23	0,029
24	0,101
25	0,113
26	0,128
27	0,112
28	0,093
29	0,107
30	0,125
31	0,099
32	0,091
33	0,107
34	0,125

Продовження таблиці Л

1	2
35	0,100
36	0,091
37	0,100
38	0,120
39	0,110
40	0,090
41	0,086
42	0,104
43	0,116
44	0,116
45	0,105
46	0,077
47	0,105
48	0,076
49	0,096
50	0,105
51	0,087
52	0,055
53	0,076
54	0,085
55	0,066
56	0,042
57	0,065
58	0,073
59	0,051
60	0,023
61	0,035
62	0,044
63	0,030
64	0,104
65	0,113
66	0,133
67	0,111
68	0,089

ДОДАТОК М

Таблиця М - Відхилення першої хвилі супроводжуючих вільних коливань від ППР при зустрічному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 1200 об/хв з варіюванням швидкістю різання з частотою 3Гц та амплітудою 20%

Номер різу	Відхилення від ППР першої хвилі супроводжуючих вільних коливань $\Delta_{пр}$, мм
1	0,061
1	0,079
2	0,092
3	0,064
4	0,049
5	0,069
6	0,081
7	0,058
8	0,033
9	0,046
10	0,068
11	0,061
12	0,044
13	0,044
14	0,064
15	0,049
16	0,042
17	0,044
18	0,079
19	0,028
20	0,061
21	0,033
22	0,054
23	0,068
24	0,042
25	0,057
26	0,093
27	0,046
28	0,097
29	0,068
30	0,079
31	0,093
32	0,072

Продовження таблиці М

1	2
33	0,058
34	0,075
35	0,052
36	0,037
37	0,059
38	0,072
39	0,055
40	0,045
41	0,066
42	0,037
43	0,066
44	0,062
45	0,049
46	0,064
47	0,082
48	0,069
49	0,058
50	0,059
51	0,046
52	0,053
53	0,047
54	0,056
55	0,072
56	0,054
57	0,046
58	0,052
59	0,044
60	0,055
61	0,041
62	0,053
63	0,057
64	0,037
65	0,025
66	0,039
67	0,062
68	0,051
69	0,030
70	0,048

ДОДАТОК Н

Таблиця Н - Відхилення останньої хвилі супроводжуючих вільних коливань від ППР при попутному кінцевому фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 1200 об/хв без варіюванням швидкістю різання

Номер різу	Відхилення від ППР останньої хвилі супроводжуючих вільних коливань $\Delta_{пр}$, мм
1	0,043
2	0,040
3	0,038
4	0,014
5	0,047
6	0,046
7	0,042
8	0,007
9	0,045
10	0,043
11	0,037
12	0,008
13	0,048
14	0,040
15	0,038
16	0,008