

Галузь наук «Обробка матеріалів різанням»

**ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ ПРИ ВТРАТІ
ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ
ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ**

АНОТАЦІЯ

Робота під шифром «Вібрації» складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел із 11 найменувань. Основна частина містить 29 сторінок, 12 рисунків, 1 таблиці, 11 джерел.

Метою роботи є визначення умов виникнення низькочастотних коливань при обробці похилих поверхонь кінцевими сферичними фрезами з різними режимами різання.

Задачею є дослідження характер втрати динамічної стійкості процесу обробки кінцевими сферичними фрезами та виявлення таких умов, за яких виникають низькочастотні коливання.

Актуальність роботи полягає в підвищенні динамічної стійкості процесу обробки кінцевими сферичними фрезами як процесу, який має суттєві нелінійності динаміки.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Набуло подальшого розвитку дослідження динамічної стійкості процесу обробки кінцевими сферичними фрезами з використанням вейвлету-перетворення.
2. Уперше визначені умови виникнення низькочастотних коливань при обробці похилих поверхонь з різними кутами нахилу.

Основні методи дослідження: метод обробки матеріалів різанням; вейвлет-аналіз.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	5
1.1. Виникнення вібрацій при різанні.....	5
1.2. Динамічна стійкість процесу різання кінцевими сферичними фрезами	7
1.3. Методи дослідження вібросигналу.....	10
РОЗДІЛ 2. СУТНІСТЬ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....	12
2.1. Сутність вейвлет-аналізу	12
2.2. Досвід застосування вейвлет-аналізу при обробці матеріалів різанням	16
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ.....	19
3.1. Методика проведення експериментальних досліджень	19
3.2. Аналіз отриманих даних.....	22
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	29

ВСТУП

Процес різання є складним термодинамічним процесом, який супроводжується коливаннями різної природи, що мають різний, здебільшого негативний, вплив на кінцевий результат обробки. Фрезерування є процесом переривчастим, що вносить додатковий вплив на виникнення вібрацій при різанні. У той час як при точінні головними складовими частотного спектру вібрацій є частоти власних коливань системи (першої моди та мод вищих порядків), при фрезеруванні резонансні явища є значно складнішими для аналітичного опису, оскільки врізання та вихід зубів фрези вносять нові гармоніки в частотний спектр.

При обробці різанням порядок частот власних коливань технологічної системи (ТС) складає близько 1 кГц. Частота проходження зуба кінцевої фрези є меншою (так, наприклад, для високошвидкісної обробки двозубою фрезою при частоті обертання шпинделя 15000 об/хв частота проходження зуба буде 0,5 кГц). На сучасних металообробних верстатах з ЧПК на етапі чистової обробки просторово-складних поверхонь деталей переважно використовуються кінцеві сферичні фрези. Унаслідок малих значень припуску при обробці кінцевими сферичними фрезами час різання може бути на порядок менший часу холостого руху зуба фрези при її обертанні, а нормальна часу стружкоутворення може бути навіть меншою періоду коливань ТС на частотах власних коливань. У поєднанні зі складними термомеханічними процесами, що мають місце безпосередньо в зоні різання, загальна динаміка процесу різання кінцевими сферичними фрезами характеризується суттєвими нелінійними явищами, впливом яких на результат обробки не можна нехтувати. З цих причин, виникнення вібрацій при різанні кінцевими сферичними фрезами потребує окремого детального вивчення, зокрема у низькочастотному діапазоні (з частотами, меншими частоти проходження зуба фрези).

РОЗДІЛ 1. ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1. Виникнення вібрацій при різанні

Вперше питанню вібрацій була присвячена стаття Тейлора [1], в якій він детально описував фактори, які впливають на явище «дрожання резцов», де розглядалася форма і розміри оброблюваного виробу, інструменту та інше.

У роботах Н. С. Штейнберга [2] було досліджено вібрації при різанні у зв'язку з утворенням наросту на передній поверхні інструменту. Причиною виникнення вібрацій, що відбуваються з частотою власних коливань оброблюваної деталі розглядався періодичний зрив наросту.

Н. А. Дроздов [3] у своїй роботі заперечує трактовку вібрації при різанні як вимушених коливань і пояснює вплив періодичних сил різання і тертя як першопричини виникнення автоколивань.

У подальшому теорію автоколивань розвинув в своїх роботах А. И. Каширин [4], де детально виклав аналіз і критику пояснень вібрації як вимушених коливань. Автор показав, що обробка крихких матеріалів менш схильна до появи вібрації, не дивлячись на періодичне утворювання елементів стружки з відколюванням, різання в'язких матеріалів більш схильне до вібраційного режиму, хоча утворює зазвичай зливну стружку і особливо часто викликає сильні вібрації при практично застосовуваних швидкостях різання.

Великий вклад в дослідження вібрацій при різанні зробив А. П. Соколовський [5]. Він показав, що зміна сили різання представляє собою функцію швидкості відносних коливань між інструментом і заготовкою. За його гіпотезою величина сили різання при русі в сторону заготовки відрізняється від сили при русі у зворотному напрямку, що визначає перебіг автоколивального процесу.

З 1960-х рр. дослідження коливань при різанні змінює напрямок у сторону дослідження верстатів і об'єкт зацікавленості переноситься з фізичного процесу на технічну систему. В. А. Кудинов [6] запровадив поняття «динамическая характеристика резания», що визначає фазовий зсув між

змінюю координати і змінюю сили різання. Величина фазового зсуву визначається постійною стружкоутворення. Також він розглянув динамічну систему верстата як замкнуту багатоконтурну систему, що включає взаємодію пружної системи верстата зі всіма робочими процесами, які протікають в його рухомих і нерухомих з'єднаннях, на основі теорії автоматичного керування.

Виходячи з вищеперерахованого, можна зробити висновки, що вібрації при різанні поділяють на дві групи:

- автоколивання — коливання, що виникають в наслідок фізичних особливостей процесу різання;
- вимушені коливання — коливання, що обумовлені конструктивними особливостями і похибками верстата.

Причини виникнення автоколивань: непостійність сили тертя стружки, що сходить по інструменту, і інструмента по заготовці; непостійність наросту, який призводить в процесі різання до зміни кута різання і площі поперечного перерізу зрізу; нерівномірне зміцнення зрізаного шару по його товщині.

Причини виникнення вимушених коливань: змінні сили, які діють на систему в результаті переривчастого різання або нерівномірного припуску; сили удару, які викликані несправним станом і неточністю виготовлення робочих поверхонь в деталях механізмів і передач руху, різкими включеннями і переключеннями; відцентрові сили інерції нерівноважених обертових мас.

Також можна припустити, що у дослідженні вібрацій при різанні виділяють два основних етапи:

- вивчення вібрацій як фізичного процесу;
- вивчення динаміки верстатів як технічної системи для реалізації цього процесу.

Регенеративна природа виникнення та розвитку вібрацій при різанні є на сьогодні загальноприйнятою теорією (у вітчизняній літературі зустрічається термін «різання по сліду»). Сутність регенеративних коливань зводиться до того, що непостійність глибини різання, що виникає внаслідок суперпозиції

поточної траєкторії руху різальної кромки та сліду від попереднього руху, спричиняє коливання сили різання. Таким чином, коливання виникають і підтримуються протягом всієї обробки. У випадку фрезерування при певних співвідношеннях частоти обертання шпинделя та частот власних коливань ТС амплітуда вібрацій збільшується, що свідчить про динамічно нестійкий коливальний стан системи.

1.2. Динамічна стійкість процесу різання кінцевими сферичними фрезами

Один зі шляхів зниження негативного впливу вібрацій складається з прогнозування вібростійких режимів обробки виходячи з того, що технологічна система при різанні є замкнутою пружно-динамічною системою. Вібростійкість процесу різання визначається динамічними характеристиками технологічної системи і процесу різання. В плані виникнення коливань домінуючими можуть бути три складові технологічної системи: жорсткість деталі j_d ; жорсткість фрези $j_{фр}$; жорсткість верстата j_v . В залежності від конкретних умов процесу фрезерування домінуючою складовою може бути будь-яка з них або їх поєднання. Розглянемо коливальну технологічну систему з одним ступенем вільності (рис. 1.1.).

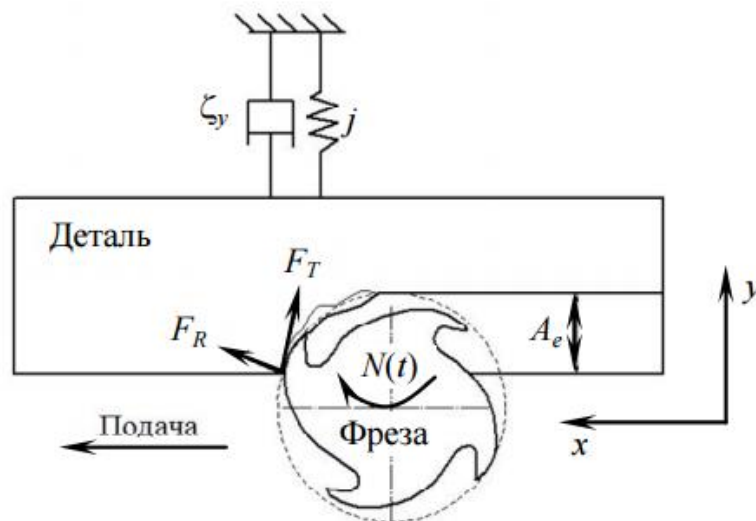


Рис. 1.1. Схема фрезерування з одним ступенем вільності

За умови, коли жорсткість деталі буде перевищувати жорсткість фрези, рівняння динамічної системи прийматиме такий вигляд [7]:

$$\ddot{y}(t) + \zeta_y^2 \dot{y}(t) + \omega_y^2 y(t) = F_y(t), \quad (1)$$

де $\zeta^2 = \frac{c}{m}$ — коефіцієнт демпфування;

c — модальне загасання;

$\omega^2 = \frac{j}{m}$ — радіальна частота власних коливань системи ;

m — маса деталі.

Оскільки ми розглядаємо систему з елементом, що запізнюється, то величина проекції сили $F_y(t)$ визначається за формулою:

$$F_y(t) = A_p \sum_{j=1}^z [(K_R \cos \varphi_j - K_T \sin \varphi_j) h_j(t)],$$

де A_p — осьова глибина різання;

K_R — питомий коефіцієнт різання у радіальному напрямку;

K_T — питомий коефіцієнт різання у тангенціальному напрямку.

$h_j(t) = g_j(t) \{ f_z \sin \varphi_j + [x(t) - x(t - \tau(t))] \cos \varphi_j \}$ — товщина зрізу:

f_z — подача на зуб;

$x(t)$ — поточне положення інструменту;

$x(t - \tau(t))$ — попереднє положення інструменту, де $\tau(t)$ — регенеративна затримка, яка являється періодичною в часі у зв'язку зі змінами частоти обертання шпинделя (у випадку постійної частоти обертання шпинделя τ є константою);

$g_j(t) = \begin{cases} 1, & \phi_{st} < \phi_j < \phi_{ex} \\ 0 & \end{cases}$ — функція зуба :

ϕ_{st} — кут входу інструменту;

ϕ_j — кутове положення різальної кромки;

ϕ_{ex} — кут виходу інструменту.

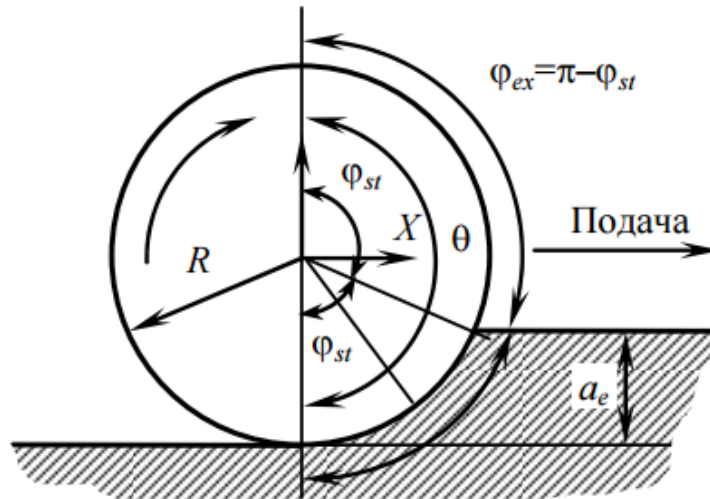


Рис. 1.2. Кути входу і виходу зубів фрези

Для зручності оцінки стабільності процесу зміни швидкості обертання шпинделя рівняння (1) можна представити у формі пари спільних диференціальних рівнянь першого порядку відносно змінних стану

$\{x_1(t), x_2(t)\}$, $x_1(t) = y(t)$; $x_2(t) = \dot{y}(t)$: $\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t - \tau(t))$,

де $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$, $A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{H(t)A_p}{m} - \frac{j}{m} & -\frac{1}{m} \end{bmatrix}$, $B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{H(t)A_p}{m} \end{bmatrix}$,

$u(t - \tau(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ x_1(t - \tau(t)) \end{bmatrix}$;

$H(t) = \sum_{j=1}^Z g_j(t) [K_R \cos \phi_j - K_T \sin \phi_j] \cos \phi_j$.

Матриця динамічних коефіцієнтів визначається у межах кута

$\phi_{cont} = [\phi_{st}; \phi_{ex}]$:

$a_{yy} = -\frac{1}{2} [\cos 2\phi + 2K_R \phi + K_R \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}$.

Передавальна функція виражається через формулу:

$G_y(i\omega_c) = \frac{\omega_{ny}^2/j}{\omega_{ny}^2 - \omega_c^2 + 2\zeta\omega_{ny}\omega_c i}$,

де ω_{ny} — радіальна частота власних коливань,

ω_c — радіальна частота вібрацій.

Заготовка має більше ніж один режим вібрації в одному напрямку, тому передавальна функція G_y може бути визначена шляхом суперпозиції

$$G_y = \sum_{v=1}^r \frac{\omega_{nyv}^2 / j_v}{\omega_{nyv}^2 - \omega_c^2 + 2\zeta \omega_{nyv} \omega_c i},$$

де індекс v означає параметр v^{th} режиму вібрації.

При обробці кінцевою сферичною фрезою кут контакту між фрезою та заготовкою ϕ_{cont} , нелінійно залежить від радіуса фрези r , ширини різання a_e (величини зміщення фрези відносно попереднього проходу), радіального припуску на обробку a_p та кута упередження ξ . Унаслідок цього ТС піддається додатковим нелінійним впливам при зміні a_p , a_e та ξ .

1.3. Методи дослідження вібросигналу

При віброзмінах механічний параметр зазвичай перетворюється в електричний сигнал, який можна побачити на екрані осцилографа. Осцилограма сигналу представляє собою графік миттєвого значення величини, що спостерігається, у вигляді функції часу. В якості механічного параметра використовують абсолютні вібропереміщення елемента поверхні або його відносне вібропереміщення відносно елемента іншої частини обладнання. Похідна від величини вібропереміщення є віброшвидкістю, а друга похідна — віброприскорення. Ці параметри вимірюються датчиками відповідних типів або перетворюються з одного виду в інший за рахунок однієї або двох операцій диференціювання або інтегрування [7].

У даній роботі розглянемо два методи дослідження вібросигналу: швидке перетворення Фур'є (ШПФ) та віконне перетворення Фур'є [8].

Швидке перетворення Фур'є — це алгоритм швидкого обчислення дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), який був запропонований у 1965 р., заснований на послідовному зведенні матриці фазових множників розмірністю $2^k \times 2^k$ до двох матриць розмірністю $2^{k-1} \times 2^{k-1}$. Найбільш поширений варіант ШПФ передбачає схему перетворення вхідних (дійсних) значень сигналу в вихідні (комплексні) значення спектральних компонент, за якими легко знаходяться амплітуди і фази цих компонент. Кількість вхідних значень сигналу повинно являти собою натуральну степінь двійки, причому

використовується лише половина знайдених вихідних спектральних компонент та в ній не рекомендується використовувати відоме число вищих частот.

ДПФ є одним із найпоширеніших способів аналізу сигналу, який застосовується у всіх галузях науки і техніці. Алгоритми і програми ШПФ включені у стандартні пакети обробки даних і апаратно реалізовані у великій кількості аналізаторів вібросигналів. Але до появи комп'ютерів дискретне перетворення Фур'є використовувалося рідко, оскільки обчислення 32-точкового ДПФ потребує 1024 операції комплексного множення і складання.

Другий метод дослідження — віконне перетворення Фур'є (ВПФ).

Зазвичай на практиці спостереження безперервного сигналу здійснюються протягом обмеженого інтервалу часу. В дійсності сигнал може містити складові, які або мають період, відмінний від періоду основної частоти, або навіть не являються строго періодичними, до того ж і реальний інтервал спостережень може не співпадати з періодом основної складової сигналу. В таких випадках виникає спектральне розсіювання. Якщо значення сигналу на початку інтервалу не співпадає зі значенням сигналу у його кінці, то з'являються безліч високочастотних компонент.

Для подолання цього явища використовують «вікна» спостереження, роль яких складається у спеціальній компенсації спотворень в часовій або частотній області. Кожному вікну відповідає своя вагова функція, на яку множать відповідно сигнал або спектр.

Віконне перетворення Фур'є визначається

$$F(t, w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) W(\tau - t) e^{-i\tau w} d\tau ,$$

де $W(\tau - t)$ — деяка віконна функція.

ВПФ, на відміну від звичайного перетворення Фур'є, вже є функцією від часу, частоти і амплітуди. Тобто вона дозволяє отримувати характеристику розподілу частоти сигналу (з амплітудою) в часі.

Найважливішим є те, що на відміну від звичайного перетворення Фур'є ми отримуємо значення частот відносно осі часу, тобто отримуємо частотно-

часову характеристику сигналу. Але головною проблемою у використанні віконного перетворення Фур'є для отримання частотно-часової характеристики сигналу є так званий принцип невизначеності Гейзенберга, який виникає для параметрів часу і частоти сигналу. В основі принципу невизначеності лежить той факт, що неможливо сказати точно яка частота присутня в сигналі в даний момент часу (можна казати тільки про діапазон частот) і не можливо сказати в який точно момент часу частота присутня в сигналі (можна казати лише про період часу). У зв'язку з цим виникає проблема роздільної здатності. Роздільну здатність віконного перетворення Фур'є можна регулювати за допомогою ширини вікна. Але при збільшенні ширини вікна (зменшенні його роздільної здатності) ми збільшуємо точність відносно частоти і зменшуємо точність відносно часу.

РОЗДІЛ 2. СУТНІСТЬ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

2.1. Сутність вейвлет-аналізу

Вейвлет (від франц. "ondelette" — коротка хвиля) — математична функція, що дозволяє аналізувати різні частоти даних. Перше використання терміну «вейвлет» фіксується у середині 80-х рр., особливо у роботах Морле, Гроссмана, точного визначення він не отримав. Даний аналіз даних використовується майже в усіх галузях і характеризується стрімким вивченням та розвитком [8].

Вейвлет-аналіз дає можливість отримати більш точне представлення при невеликому обсязі отримуваних даних. Даний аналіз, як і більшість інших, описується графіком функції, що має хвилеподібну форму з амплітудою, яка знижується до нуля від початку її існування (початку координат). Якщо розглядати дану функцію у загальному розумінні, то аналіз сигналів проводиться у вейвлет-площині (масштаб — час — рівень). Інтегрування даних отриманих сигналів дозволяє отримати вейвлет-спектр, який

принципово відрізняється від звичного спектру Фур'є, але дає можливість прив'язати спектр особливих сигналів до часу.

Термін вейвлет-перетворення (ВП) об'єднує два види перетворень — пряме і обернене, які, відповідно, переводять досліджувану функцію $f(x)$ в набір вейвлет-коефіцієнтів $W_\Psi(a, b)f$ і назад [9].

Класифікують вейвлет-алгоритм в залежності від особливостей його використання виділяючи безперервне (CWT — Continuous Wavelet Transform) і дискретне (DWT — Discrete Wavelet Transform) вейвлет-перетворення.

Одержати набір вейвлет-коефіцієнтів у випадку дискретного перетворення швидше, і воно дає досить точне подання сигналу при меншому обсязі одержуваних у результаті даних. Безперервне перетворення вимагає більших обчислювальних витрат, але, разом із цим, дозволяє детальніше роздивитися структуру сигналу.

Базисний або материнський вейвлет (parent wavelet) Ψ створюється за допомогою розтягнень та зсувів сім'ї $\Psi\left(\frac{a-b}{a}\right)$. Пряме ВП здійснюється відповідно до правила:

$$W_\Psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_\Psi}} \int \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{a-b}{a}\right) f(x),$$

де a і b — параметри, що визначають відповідно масштаб і зсув функції ψ , яка називається аналізуючим вейвлетом,

C_Ψ — формувальний множник.

Інтегрування ведуть по всій числовій осі.

Маючи відомий набір коефіцієнтів $W_\Psi(a, b)f$, можна відновити первинний вигляд функції $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{C_\Psi}} \iint \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{a-b}{a}\right) [W_\Psi(a, b)] \frac{da db}{a^2}.$$

Пряме і обернене перетворення залежать від деякої функції $\Psi(x) \in L^2(R)$, яку називають базисним вейвлетом. Практично єдиним обмеженням на його вибір є умова скінченності нормувального множника:

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Phi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Phi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty,$$

де $\hat{\Psi}(\omega)$ — Фур'є-образ вейвлету $\Psi(x)$: $\hat{\Psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) e^{-t\omega X} dx$.

Безліч функцій задовольняють даній умові, тому можна підібрати вид вейвлету, який найбільш підходить для рішення конкретного завдання.

Умова прямого вейвлет-перетворення означає, що Фур'є-образ вейвлету дорівнює нулю при нульовій частоті, тобто $\hat{\Psi}(\omega)|_{\omega=0} = 0$. Якщо це не так, то знаменник в інтегралі прямого вейвлет-перетворення прямує до нуля, у той час як чисельник має відмінне від нуля значення, і коефіцієнт C_{Ψ} перестав бути кінцевим.

У свою чергу, цю вимогу можна подати в іншому вигляді. Оскільки Фур'є-образ $\hat{\Psi}(\omega)$ при нульовій частоті має вигляд $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) dx$ ми можемо вимагати рівність нулю інтеграла від вейвлету по всій осі:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) dx = 0.$$

Додатковий критерій пред'являється для комплексних вейвлетів, а саме, що для них Фур'є-перетворення має бути одночасно речовим і має спадати для негативних частот.

Локалізація: вейвлет повинен бути безперервним, інтегрованим, мати компактний носій і бути локалізованим як в часі (в просторі), так і по частоті. Якщо вейвлет в просторі звужується, то його середня частота підвищується, спектр вейвлету переміщується в область більш високих частот і розширюється. Цей процес повинен бути лінійним — звуження вейвлету вдвічі повинно підвищувати його середню частоту і ширину спектра також удвічі.

В практиці обробка потоків числової інформації розглядається як високочастотна та низькочастотна [10].

Низькочастотний фільтр виділяє низькочастотну формоутворюючу в потоці числової інформації. Ці складові можна уявити як головну характеристику числового потоку послідовних чисел або усереднене значення фіксованої кількості послідовних чисел потоку, що розглядається.

Високочастотний фільтр може бути отриманою складанням різниці між вихідним числовим потоком та низькочастотною складовою. Високочастотну складову можна розглядати як відхилення вихідного потоку від усередненого значення або похибку подання вихідного потоку за допомогою низькочастотного

Більшість типів вейвлетів не мають аналітичного опису у вигляді однієї формули, а задаються ітераційними виразами, які легко обчислюються комп'ютерами. Прикладом таких вейвлетів є функції Добеші (Daubechies). На рис. 2.1. зображено вейвлет-функцію та функцію масштабу вейвлету Добеші 4.

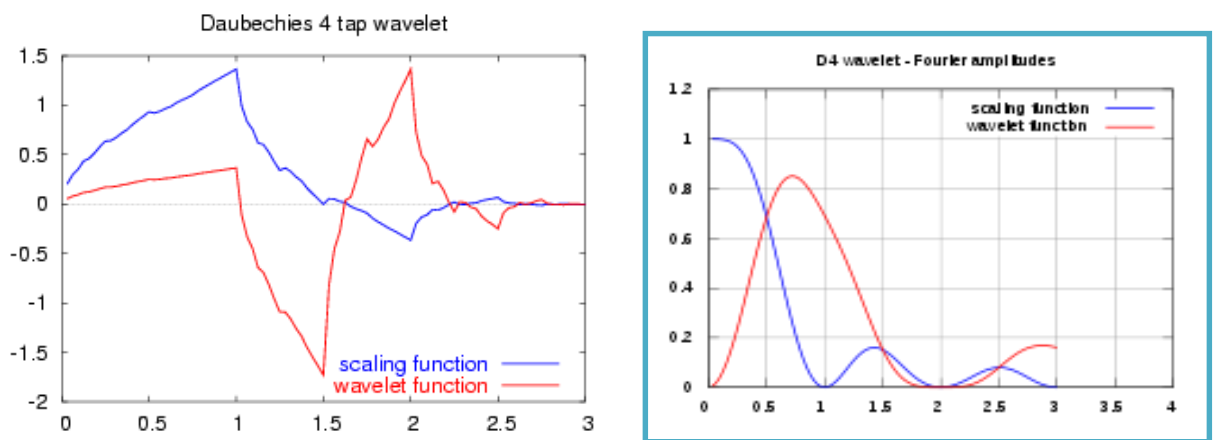


Рис. 2.1. Вейвлет Добеші db4

Вихідним моментом при побудові ВП, пов'язаних із рівномірною сіткою, є кратне-масштабування. В найпростішому випадку — вейвлет Хаара. Для отримання інших варіантів ВП задаються значенням числа d_j і розглядають кратне-масштабування рівнянням вигляду:

$$\omega(t) \equiv d_0\omega(2t - 0) + d_1\omega(2t - 1) + d_2\omega(2t - 2) + \dots + d_N\omega(2t - N).$$

Масштабну функцію $\omega(t)$ підпорядковують тим чи іншим умовам — умові нормування та ортогональності:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\omega(t)|^2 dt = 1;$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(2t - j)\omega(2t - k) dt = 0,$$

при $j \neq k$.

Варто відмітити, що визначення функції ω є досить важким [11]. Основним і одним із найраціональніших методів є використання перетворення

Фур'є для кратно-масштабувального рівняння. Це призведе до отримання образу Фур'є функції до функції ω у вигляді безкінечного виразу, звідки можна, щонайменше, використати значення у двійкових точках дійсної осі:

$$d_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad d_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad d_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad d_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

А інші значення d_j будуть рівними нулю, отримаємо D4-вейвлет Добеші.

У залежності від обраного значення коефіцієнта d_j можна отримати інші варіанти вейвлетів-Добеші, які відрізняються один від одного, а також не мають властивості симетрії.

Узагальнюючи вищесказане можна визначити позитивні і негативні сторони даного аналізу. Переваги: вейвлетні перетворення володіють всіма перевагами перетворень Фур'є; вейвлетні базиси можуть бути добре локалізовані як за частотою, так і за часом (при виділенні в сигналах добре локалізованих різномасштабних процесів можна розглядати тільки ті масштабні рівні розкладання, які представляють інтерес); базисні вейвлети можуть реалізуватися функціями різної гладкості. Недолік — це відносна складність перетворення.

2.2. Досвід застосування вейвлет-аналізу при обробці матеріалів різанням

Одна з головних ідей уявлення сигналів на різних рівнях розкладання (декомпозиції) полягає в поділі функції наближення до сигналу на дві групи: апроксимуючу — грубу, з досить повільною тимчасовою динамікою зміни, і деталізуючу — з локальною та швидкою динамікою зміни на тлі плавної динаміки, з подальшим їх дробленням і деталізацією на інших рівнях декомпозиції сигналів (рис.2.2). Новий напрямок цифрової обробки сигналів — вейвлет-аналіз, робить це можливим як в тимчасовій, так і в частотній областях уявлення сигналів в режимі реального часу.

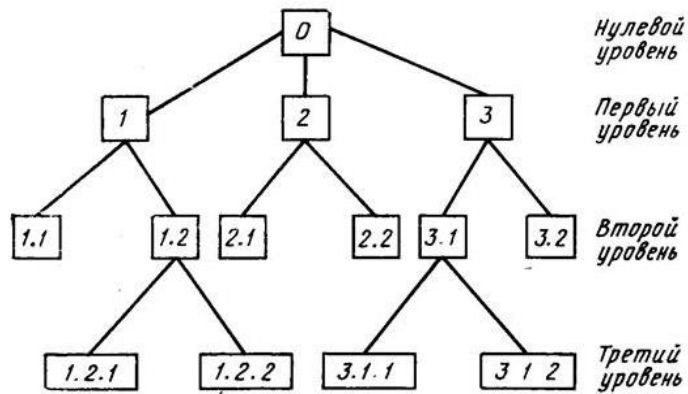


Рис. 2.2. Дерево декомпозиції

Основна область застосування вейвлет-перетворень — аналіз і обробка сигналів і функцій, нестационарних в часі або неоднорідних в просторі, коли результат аналізу повинен містити не тільки загальну частотну характеристику сигналу (розподіл енергії сигналу по частотним складовим), але і відомості про певні локальні координати, на яких виявляють себе ті чи інші групи частотних складових сигналу.

Загальний алгоритм фрактального аналізу сигналу:

- 1) береться довільна ділянка вихідних даних;
- 2) до цієї ділянки застосовується деяке перетворення (зазвичай це зрушення, стиснення, розтягнення);
- 3) зміненою ділянкою покривається весь часовий ряд;
- 4) в кожній точці часового ряду шукаються коефіцієнти подібності вихідної ділянки — поточної (зазвичай за методом найменших квадратів);
- 5) за вихідною ділянкою береться наступна частина часового ряду і алгоритм повторюється з першого пункту;
- 6) в результаті дослідник отримує набір коефіцієнтів подібності і бачить тим самим розподіл ступеня подібності (його фрактальних властивостей) по тимчасовому ряду в кожній його точці.

При підвищенні ступеня зносу інструменту відбувається втрата корисних властивостей сигналу, а саме — спотворення і втрата інформації про

динаміку процесу механічної обробки, за рахунок збільшення впливу на сигнал шумових компонентів.

Зі збільшенням зносу інструменту змінюється енергетика сигналу. При параметрах зносу, близьких до катастрофічного, основна потужність сигналу доводиться на високочастотний шумовий компонент, що свідчить про відсутність процесу різання як такого. Енергія, що надходить від різця, витрачається на поверхневе зміцнення заготовки і нагрів. Зовнішній вигляд атрактора не змінюється, однак зі зростанням зносу збільшується масштаб атрактора динамічної системи різання.

При збільшенні зносу інструменту компоненти сигналу характеристики процесу різання, приймають більш згладжений характер, але при цьому з'являються високочастотні сплески, що свідчить про підвищення рівня шуму. У той же час на вейвлет-скалограмі видно, що при збільшенні зносу інструменту спектр частот, що характеризує різання, розширюється, потужність його збільшується. Розширення спектру говорить про підвищення енергії віброакустичного сигналу і відповідно про збільшення енергії руйнування і подальшому збільшенні ступеня зносу. При цьому значення домінуючої частоти не змінюється і становить 2,8-3,2 кГц, але істотно змінюється її потужність. Як відомо, фрактальна розмірність показує хаотичність стану системи, тобто рівень її нестабільності.

Висновком даних аналізів можна сказати, що при збільшенні зносу інструменту відбувається збільшення дійсного значення фрактальної розмірності. Зі збільшенням зносу інструмента хаотичність динаміки процесу різання також збільшується, простежується кореляція між цими характеристиками. Сталий рух системи різання обумовлено самоорганізацією процесів пластичної деформації в приконтактних шарах стружки.

На практиці наведені результати передбачається використовувати шляхом розробки діагностичної методики, заснованої на поточній оцінці ступеня зносу на базі фрактального і вейвлет-аналізу, здійснюючи тим самим надійний автоматичний контроль за станом інструменту і динамічних процесів

в системі різання при металообробці. Необхідність такої оцінки обумовлена великим впливом зносу ріжучого інструменту на стан динамічної системи верстата і його параметричної надійності, аж до його відмови.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ

3.1. Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились на трьохосьовому фрезерному верстаті моделі Victor VC-85 з системою ЧПК Fanuc 0i-MD. Фрезерування заготовки з конструкційної сталі марки Сталь 45 здійснювалось твердосплавною монолітною двозубою кінцевою сферичною фрезою $d_\phi = 8$ мм моделі JS532080D1B.0Z2-NXT фірми Seco Tools, затиснутою в цанговому патроні типу BT40-ER32-. Виліт фрези $l_\phi = 32$ мм.

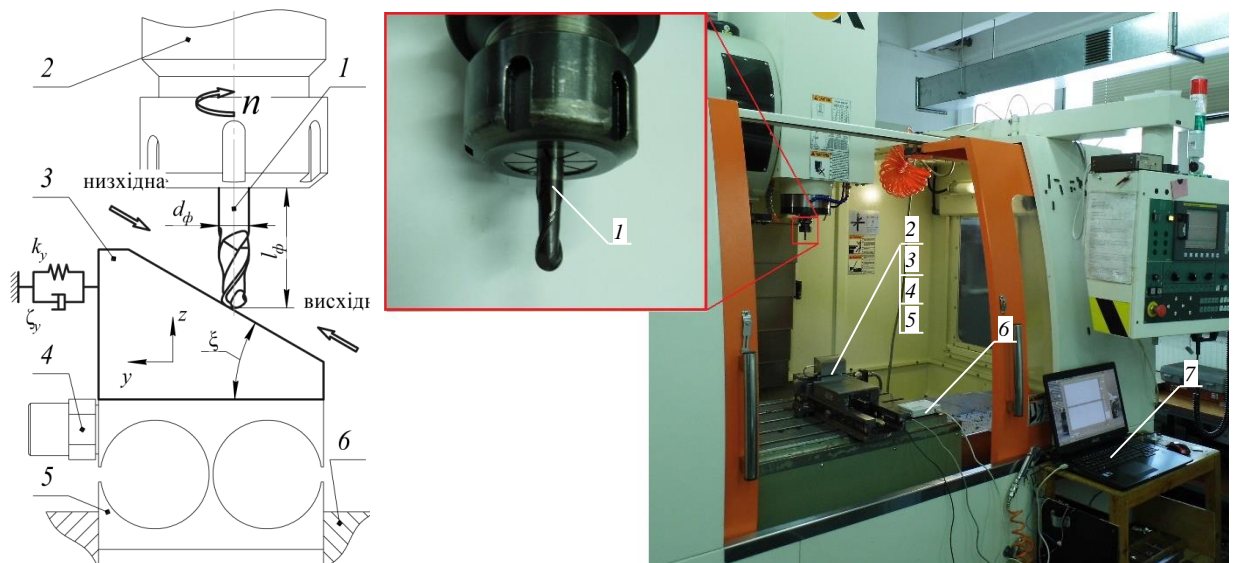


Рис. 3.1. Схема експериментальної установки

Схема експериментальної установки представлена на рис. 3.1. Заготовка (3) з похилою оброблюваною поверхнею розміщується на підкладці (5), піддатливій в напрямку осі y . До даної підкладки через штифт M5 прикріплений перетворювач п'єзоелектричний вібровимірювальний (4)

моделі ДН-4-М1. Верхнє значення вимірювального діапазону даного перетворювача складає 12600 Гц.

Дана експериментальна установка дає змогу дослідити суттєво нелінійні ефекти при фрезеруванні кінцевими сферичними фрезами. При проведенні тестів з величинами глибини різання, які є типовими для обробки даним типом фрез у виробничих умовах, внаслідок коливань при певних значеннях амплітуди заготовка випадковим чином виходить з контакту з зубом фрези. Очікується, що в більшій мірі такий ефект спостерігатиметься при зустрічній обробці, оскільки за такої схеми при раптовому виході зуба фрези з тіла заготовки відбуватиметься різка зміна величини амплітуди коливань.

Метою проведення експериментів є дослідження стійкості процесу фрезерування кінцевою сферичною фрезою поверхні, нахиленої під кутом ξ по відношенню до осі u . При цьому рух подачі здійснюється під кутом ξ по відношенню до осі u за зустрічною схемою різання у висхідному та у низхідному напрямках. Перед здійсненням тестових проходів до торців піддатливої підкладки (5) прикріплюються пластини для підвищення жорсткості і попередньо виконуються підготовчі проходи необхідної глибини для забезпечення зустрічної схеми різання при тестових проходах (рис. 3.2).

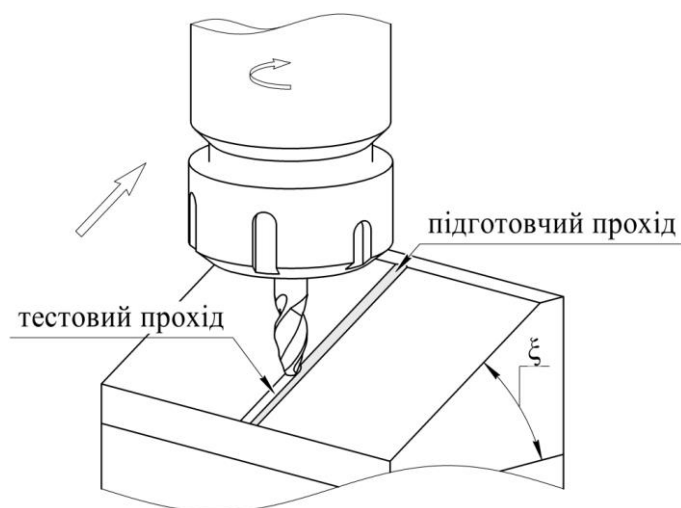


Рис. 3.2. Схема проведення тестових проходів по зустрічній схемі різання з подачею у висхідному напрямку

При фрезеруванні значення подачі було сталим для всіх тестів і склало $s_z = 0,10$ мм. При цьому значення кута нахилу оброблюваної поверхні ξ склали 15° ; $22^\circ 30'$; 30° ; $37^\circ 30'$; 45° ; $52^\circ 30'$. Значення глибини різання для різних тестів лежать в діапазоні від 0,10 мм до 0,50 мм. Значення швидкості обертання шпинделя для різних тестів лежать в діапазоні від 5852 об/хв до 8008 об/хв.

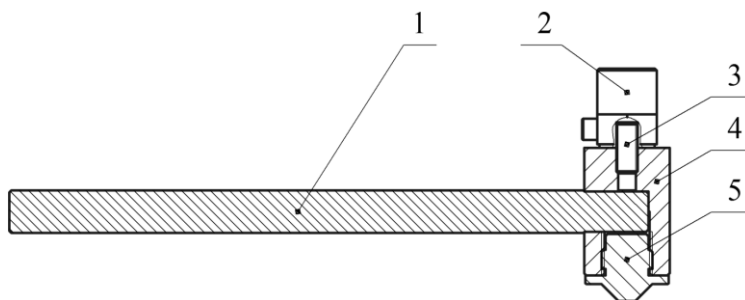


Рис. 3.3. Схема пристрою нанесення тестових ударів

Модальний аналіз експериментальної установки здійснювався з використанням пристрою нанесення тестових ударів саморобної конструкції (рис. 3.3). Він складається з титанового руків'я (1), акселерометра ДН-4-М1 (2), який кріпиться через шпильку М5 (3) до головки з нержавіючої сталі (4). Головка молотка посаджена з натягом на руків'я. З протилежного від акселерометра боку головки на різьбі М12 прикріплений змінний алюмінієвий бойок (5). Загальна вага ПНТУ становить 0,160 кг.

Для визначення модальних характеристик пристроєм нанесення тестових ударів (далі ПНТУ) здійснювалось ударне збудження системи з оброблюваною заготовкою (рис. 3.1). Синхронна реєстрація сигналів з датчиків, встановлених на підкладці (рис. 3.1) та на головці ПНТУ (рис. 3.3), дає змогу визначити передавальну функцію $G_{yy}(s)$ комплексної змінної s , яка характеризує відгук системи на збудження. З дійсної частини передавальної функції $\Re[G_{yy}(s)]$ визначаються модальна частота власних коливань та модальна жорсткість першої моди вібрацій. З уявної частини передавальної функції $\Im[G_{yy}(s)]$ визначається коефіцієнт демпфування першої моди вібрацій. Визначена частота власних коливань першої моди вібрацій системи

складає $f_n = 1542$ Гц; модальна жорсткість $k_y = 12,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$; коефіцієнт демпфування $\zeta_y = 0,0275$.

Перетворення аналогового сигналу здійснювалося через АЦП моделі E14-440 фірми L-CARD. Максимальна частота перетворення даного АЦП складає 400 кГц. При цьому збір даних відбувався з частотою 10 кГц. Запис перетвореного сигналу здійснювався на ноутбук через програму LGraph2. Подальший аналіз сигналу виконувався в програмі MATLAB R2013b.

3.2. Аналіз отриманих даних

Аналіз сигналів здійснювався з метою визначення умов, за яких процес фрезерування втрачає динамічну стійкість, а також того, який характер має втрата динамічної стійкості.

У всіх проведених тестах вібросигнали мали яскраво виражений нелінійний характер. При аналізі вібросигналів їхні спектри у частотно-часовій області (отримані віконним перетворенням Фур'є) дали можливість оцінити стан системи за різних умов, виявити домінуючі гармоні на різних етапах обробки.

Також для кожного сигналу здійснювалося дискретне вейвлет-перетворення. В якості материнського вейвлету використовувався вейвлет Добеші 4 (db4), проводилось 7 ітерацій декомпозиції сигналу. При цьому робилась оцінка деталей сигналу на 4-й ітерації (4 рівень), частоти якої відповідають класичним уявленням про виникнення вібрацій внаслідок різання по сліду. Також аналізувались деталі сигналу 6 та 7 рівнів і відповідні їм коефіцієнти декомпозицій. Дані рівні декомпозиції відповідають низькочастотним коливанням, які мають місце при переході системи в хаотичний стан за сценарієм Фейгенбаума (внаслідок багаторазового подвоєння періоду коливань).

Обробці з малими кутами ξ (15° та $22^\circ 30'$) притаманні малі значення діючої швидкості різання, за якої має місце пластична деформація оброблюваного матеріалу. Це призводить до низької якості обробленої

поверхні. Зі значеннями глибини різання, при яких в зону різання потрапляє вісь фрези, одночасно обидва зуба фрези постійно знаходяться в контакті зі зрізуваним шаром; дисипативна складова енергії коливань постійно збільшується, внаслідок чого система переходить до хаотичного стану (Рис. 3.4). У подальшому при проведенні тестів ми уникали таких умов.

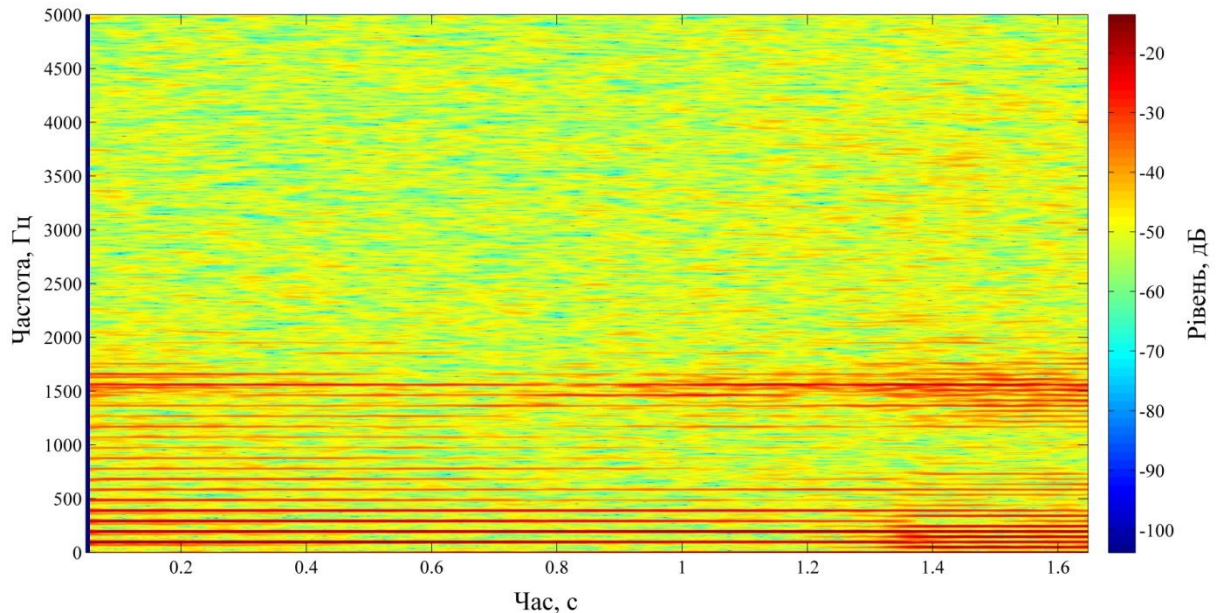


Рис. 3.4. Спектр сигналу при обробці з кутом упередження $7^{\circ}30'$

Аналіз більшості тестів показав, що при обробці поверхонь з кутами від 30° відбувалась жорстка втрата динамічної стійкості процесу різання. При цьому система переходила до хаотичного стану, про що свідчать короточасні раптові збурення.

Модель коливань досліджуваної технологічної системи зображена на рис. 3.5. У верхньому положенні (рис. 3.5а) при дії складової сили різання по нормалі до оброблюваної поверхні заготовка відтискається від фрези, через що може відбуватись самопереривання процесу різання (раптовий вихід зуба фрези з контакту із заготовкою). У нижньому положенні (рис. 3.5а) при дії складової сили різання по нормалі до оброблюваної поверхні заготовка набігає на фрезу.

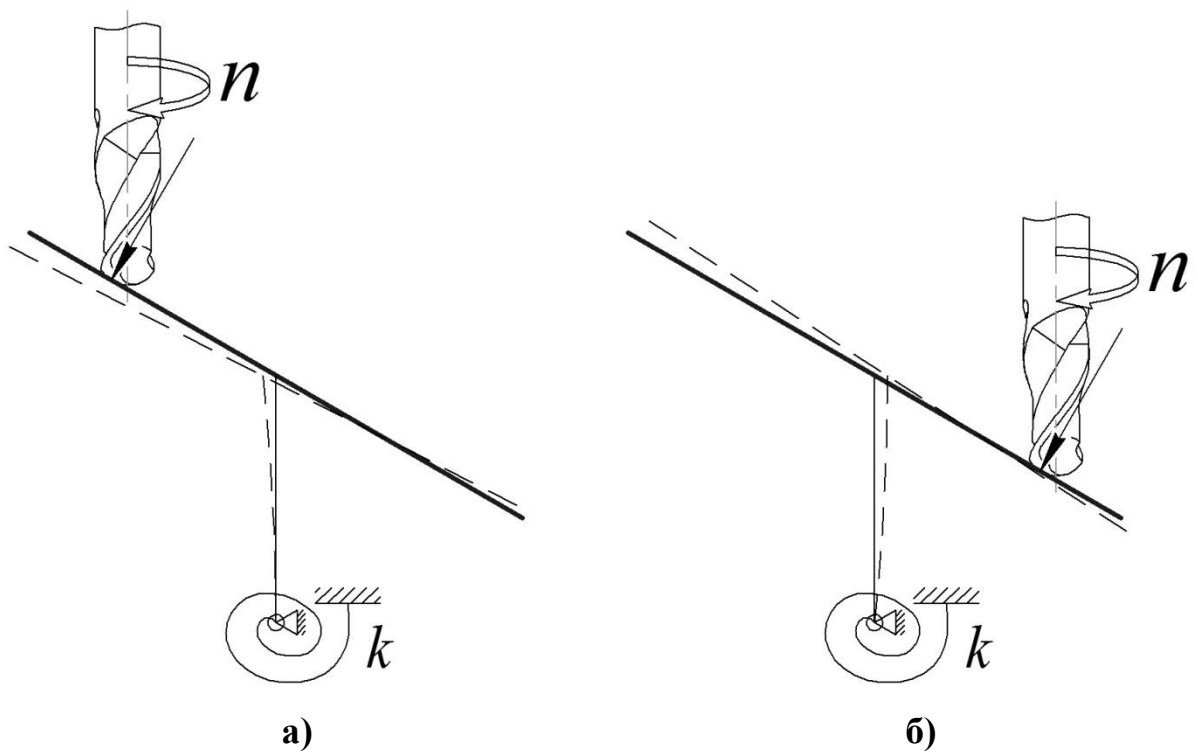


Рис. 3.5. Модель коливань досліджуваної технологічної системи

Для випадку низхідної зустрічної обробки поверхні з кутом упередження $52^{\circ}30'$ були побудовані діаграми динамічної стійкості (рис. 3.6).

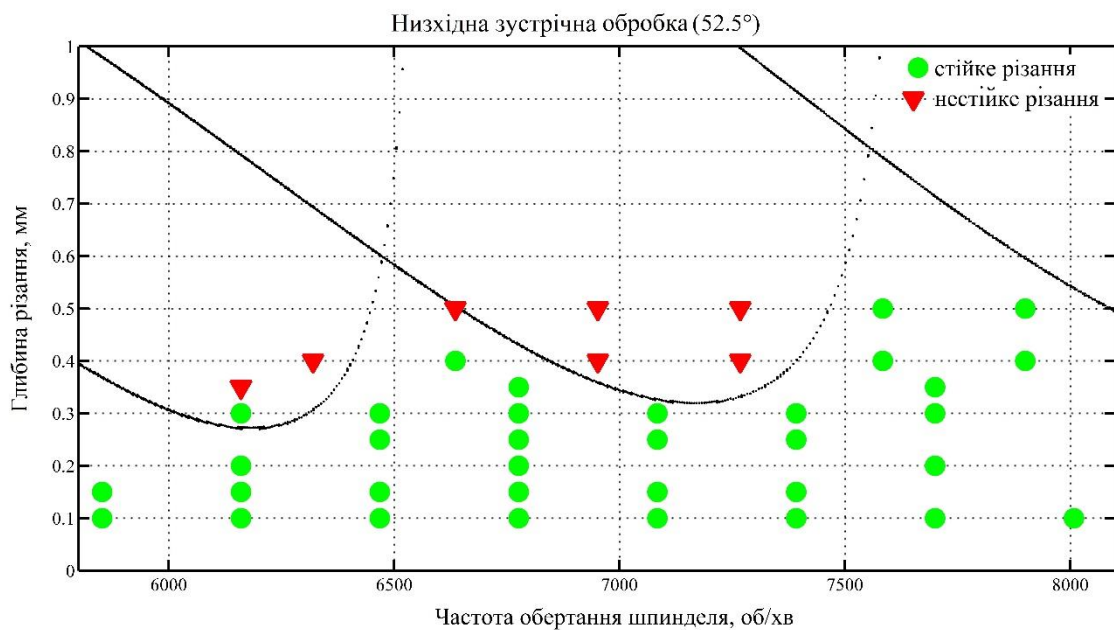


Рис. 3.6. Діаграми динамічної стійкості при обробці з кутом упередження $52^{\circ}30'$ за низхідною зустрічною схемою різання

Виміряне значення модальної радіальної частоти власних коливань ТС склало $\omega_n = 9689 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Порівняємо чотири тести, дані по яких наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

№	ξ	a_p , мм	a_e , мм	n , об/хв	Напрямок різання	Схема різання
1	52°30'	0,40	1,744	6636	низхідний	зустрічна
2	52°30	0,40	1,744	7584	низхідний	зустрічна
3	52°30	0,50	1,936	6636	низхідний	зустрічна
4	52°30	0,50	1,936	7584	низхідний	зустрічна

Частота обертання 6636 об/хв співвідноситься з частотою власних коливань системи як 1:7, а частота обертання 7584 — як 1:6,1. Таким чином, для тестів №1 та №3 повинні спостерігатись резонансні явища, у той час як для тестів №2 та №4 вони повинні мати слабше виражений характер.

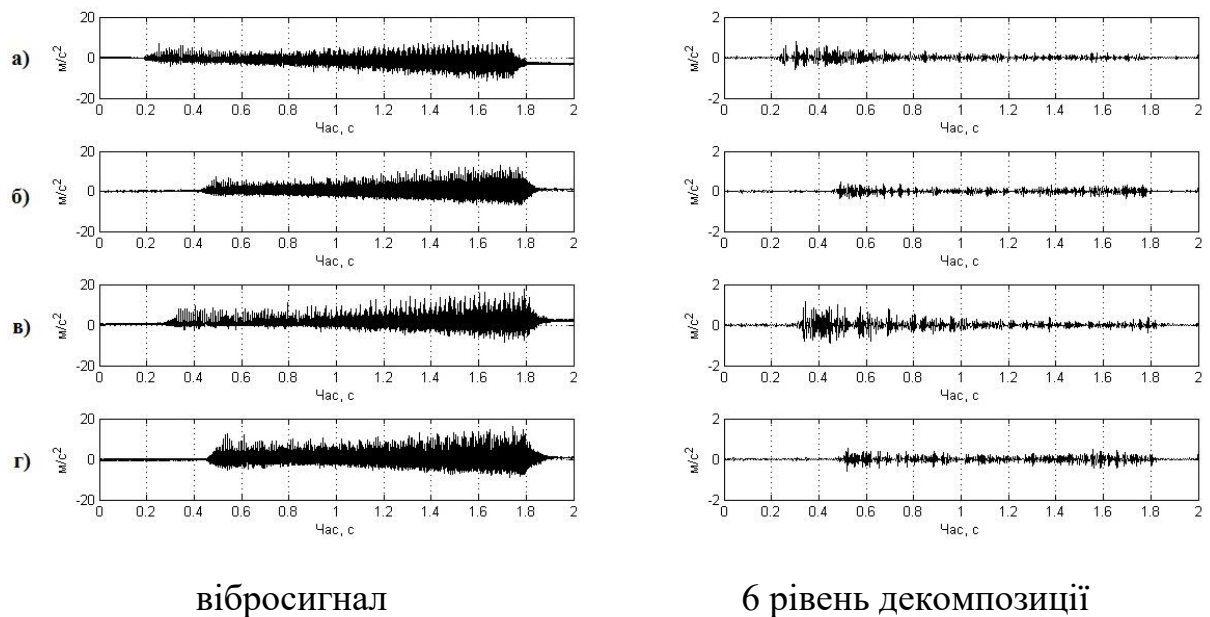


Рис. 3.7. Вібраційні сигнали та відповідні декомпозиції 6 рівня

На рис. 3.7 зображені вібросигнали та відповідні їм 6 рівні декомпозиції для тесту №1 (рис. 2а), №2 (рис. 2б), №3 (рис. 2в) та №4 (рис. 2г), отримані вейвлет-перетворенням з материнським вейвлетом Добеші db4. У даному випадку 6 рівень декомпозиції відповідає частоті обертання фрези. Як видно з

графіків, на початку сигналів, особливо у тестах №1 (рис. 2а) та №3 (рис. 2в), спостерігаються значні збурення у низькочастотному діапазоні. В подальшому ці збурення зникають, натомість збільшується амплітуда на початкових вібраційних сигналах, на частотах, що відповідають частоті власних коливань ТС. Проте втрата динамічної стійкості у низькочастотному діапазоні характеризується значним впливом на якість обробки, про що свідчить аналіз обробленої поверхні.

З точки зору математичної моделі (2) даний ефект може описуватись нелінійною складовою (3) при $k \in (0; 1)$. Механіка даного процесу переходу від низькочастотних вібрацій до вібрацій з частотою, близькою до частоти власних коливань системи, може бути наступною: на початку процесу різання при врізанні зуба фрези домінують пластичні деформації в зоні різання, так що власне зняття припуску може навіть не відбуватись через взаємне відтискання фрези та заготовки. По мірі накопичення енергії коливань системою збільшується амплітуда коливань, що видно з вібросигналів. В певний момент амплітуда коливань компенсує малі значення припуску, і в зоні різання починають домінувати пружні деформації — система переходить до усталеного коливального стану з частотами, близькими до частот власних коливань ТС (параметричні коливання).

Виміряна шорсткість при обробці поверхні з кутом упередження $52^\circ 30'$ за низхідною зустрічною схемою різання при глибині різання 0,5 мм з частотами обертання 6636 об/хв та 7584 об/хв наведені, відповідно, на рис. 3.8а та рис. 3.8б. Як видно, частота обертання має значний вплив на шорсткість обробленої поверхні за сталої глибини різання при однаковій схемі різання. Так, при частоті обертання 6636 об/хв. значення R_{\max} складає 42,8 мкм, а при 7584 об/хв — 17,5 мкм (у 2,5 рази менше).

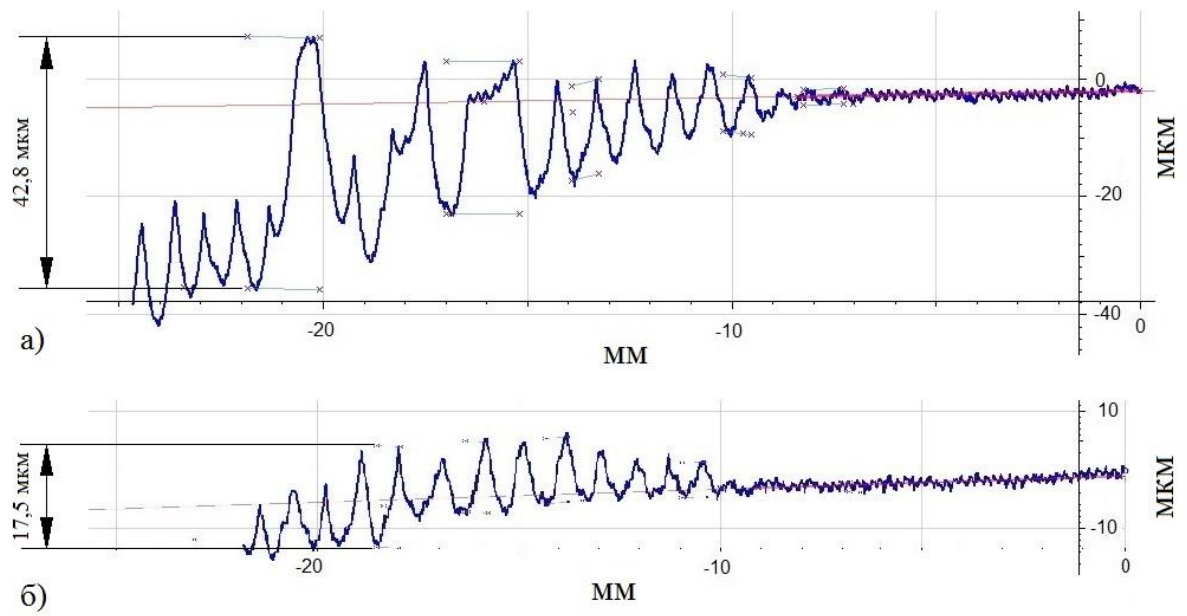


Рис. 3.8. Шорсткість оброблених поверхонь за низхідною зустрічною схемою різання з частотою обертання 6636 об/хв (а) та 7584 об/хв (б)

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження проводились з прямим подачі знизу догори за попутною схемою різання та згори донизу за зустрічною схемою різання. Втрата динамічної стійкості оцінювалась за наявністю домінуючих резонансних гармонік в частотно-часовому спектрі вібросигналу, а також за наявністю/відсутністю вібраційного сліду на обробленій поверхні. Процес вихідної попутної обробки залишався динамічно стійким в діапазоні значень частот обертання шпинделя від 5852 об/хв до 8008 об/хв. При аналізі низхідної зустрічної обробки було помічено, що на початку різання на поверхні утворювався значний вібраційний слід, який зникав по проходженні $\sim 0,7$ с. При цьому в спектрі сигналу на даній ділянці були відсутні домінуючі гармоніки на частотах, близьких до частоти власних коливань ТС. Сам вібросигнал на цій ділянці мав порівняно малу амплітуду. Розкладання сигналу через вейвлету-перетворення з материнським вейвлетом Добеші db4 дав змогу виявити суттєві низькочастотні коливання ТС на 6 рівні декомпозиції, аналіз спектру показав домінуючі гармоніки, що відповідали приблизно 0,25 та 0,50 частоти обертання шпинделя. Це однозначно свідчить про хаотичний стан динамічної системи (перехід до хаотичного стану через каскад біфуркацій). Перехід від цього стану до усталеного коливального стану з домінуючими гармоніками, близькими до частоти власних коливань ТС може бути пояснений накопиченням коливальної енергії всередині системи через нелінійний компонент (3) в математичній моделі (2) при $k \in (0; 1)$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тейлор Ф У. Исскуство резать металлы / Ф. У. Тейлор, 1909.
2. Штейнберг И. С. Устранение вибраций, возникающих при резании на токарном станке / И. С. Штейнберг. – М.: Машгиз, 1947.
3. Дроздов Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов. – Станки и инструмент, 1937
4. Каширин А. Н. Исследование вибраций при резаньи металлов / А.Н. Каширин. – М.: АН СССР, 1944
5. Соколовский А. П. Вибрации при работе на металлорежущих станках. Исследование колебаний при резании металлов/ А. П. Соколовский. – М.: Машиностроение, 1967
6. Зелинский С. А. Математическая модель процесса контурного фрезерования нежестких деталей / С. А. Зелинский, , Морозов Ю. А. , Серебрий Ю. А. – Праці Одеського політехнічного університету, 2015.-1. - с. 28-33
7. Шульман М. Х. Введения в методі обработки вибросигналов / М. Х. Шульман. -1998
8. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 2 : навчальний посібник / Кветний Р. Н. , Богач І. В. , Бойко О. Р. , Софина О. Ю. , Шушура О. М. ; за заг. ред. Р. Н. Кветного. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 230 с
9. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования / А. Н. Яковлев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
10. Введение в теорию вэйвлетов. Курс лекций / Ю. К. Демьянович, В. А. Ходаковский.; Санкт-Петербург, ПГ УПС, 2007. – 49с.
11. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Москва, "РХД", 2001 г