

УДК 621.914.5

О.В. Рублюк, к.т.н., доц.*Івано-Франківський технічний університет нафти і газу***В.Г. Панчук, к.т.н., доц.***Національний технічний університет України «КПІ»*

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНОГО СТАНУ ДИСКОВИХ ВІДРІЗНИХ ФРЕЗ І ПИЛ

В статті описано програму динамічного аналізу процесу фрезерування відрізними фрезами і пилами за критерієм динамічної стійкості фрези, яка оснащена сучасним віконним інтерфейсом, володіє широкими можливостями з керування ходом обчислень і візуалізації обчислень, дозволяє виконувати ввід і вивід інформації в зручному для наступного використання виді, є універсальною і може бути використана в інших прикладних задачах для виконання амплітудно-частотного аналізу процесів.

Вступ. Порівняльна оцінка динамічного стану є основним методом в процесі пошуку раціональних конструкцій дискових відрізнних фрез і пил з нерівномірним кроком [1], які характеризуються підвищеною динамічною стійкістю. Теоретичними дослідженнями передбачається також вплив на динаміку процесу відрізання фрезами кута нахилу зубців [2]. Але це питання ще досконало не вивчене і потребує удосконалення існуючих методів дослідження динамічного стану відрізнних фрез. Оскільки аналітичними методами неможливо розв'язати поставлені задачі, то доводиться використовувати чисельні методи, які потребують проведення великої кількості обчислень. Їх реалізація можлива тільки за наявності спеціально адаптованого програмного забезпечення.

Щоб підібрати, визначити і сформулювати вимоги до програмного забезпечення, потрібно насамперед виконати постановку задачі.

Процес відрізання фрезами з точки зору динамічного стану інструменту є одним із найскладніших за умовами роботи. В процесі роботи фрези виникають зовнішні періодичні збуджуючі сили внаслідок удару зубців при врізанні в тіло заготовки, виходу їх із зони різання і радіального та торцевого биття зубчастого вінця фрези.

В роботі [1] вказується, що первинною проблемою в дослідженні динамічного стану відрізнних фрез є задача про вимушені коливання. Аналіз задачі і методів її розв'язання виконано в роботі [3]. Зокрема

вказано, що вона може бути розв'язана шляхом розкладання за власними формами коливань і визначення власних частот. Для цього пропонуються методи, які базуються на варіаційно-сітковому підході.

Відповідно до методу, який до цього часу використовується для визначення динамічної стійкості відрізних фрез, контакт фрези із заготовкою здійснюється по зовнішньому ободу, який складається із вершин зубців. Тому ця взаємодія являє собою періодичний процес вигинання фрези в процесі її обертання і є, фактично, кінематичним збудником поперечних коливань фрези.

Як критерій динамічної стійкості фрези використовується параметр

$$B_{ij} = \frac{C_j p_j^2}{\omega_i^2 - p_j^2}, \text{ де } i = 1 \dots I, j = 1 \dots J, \quad (1)$$

де C_j — амплітуда j -ї гармоніки збуджуючої сили; p_j — її кругова частота; ω_i — i -та власна кругова частота.

Даний параметр, який являє собою амплітуду вимушених коливань фрези при заданих власній частоті ω_i і частоті збуджуючих коливань p_j , використовується як порівняльна характеристика динамічного стану дискової відрізної фрези. Фактично перевіряється, наскільки j -та гармоніка збуджуючої сили і i -та власна частота близькі до резонансного стану.

На даний час існує і використовується в дослідженнях обчислювальний комплекс, який орієнтований для роботи в середовищі MS DOS і складається із трьох окремих виконавчих модулів. Процес обчислень потребує послідовного запуску на виконання кожного з них. Це виконується вручну або з командного файлу. Ввід інформації при цьому може здійснюватись або вручну в діалоговому режимі, або з заздалегідь підготовленого текстового файлу. Дана методика незручна для виконання невеликої серії розрахунків, але може бути ефективною для виконання великої кількості обчислень в пакетному режимі. Ще один суттєвий недолік полягає у відсутності наочності при виводі та інтерпретації результатів.

Алгоритм роботи з даним обчислювальним комплексом полягає в тому, що спочатку виконуються обчислення власних форм і власних частот у виконавчому модулі R_n_s.exe. Результатом його роботи є текстовий файл Sob_numб. Вхідна інформація, яка вводиться з клавіатури, містить дані про геометричні розміри і форму диску фрези.

При цьому вважається, що фреза являє собою круглу пластину, яка защемлена по внутрішньому контуру і конструктивно може складатися з 4-х концентричних кілець різної товщини. Це дозволяє наближено змодельовувати фрези з криволінійними торцевими поверхнями.

Наступний виконавчий модуль `vs_plast.exe`, використовуючи дані про кутове розміщення зубців на ободі фрези, частоту обертання фрези і розміри та положення плоскої заготовки визначає часову залежність сили різання за один період. Тривалість періоду рівна часу роботи однієї групи зубців у фрез з нерівномірним кроком. Визначається кількість одночасно працюючих зубців і це значення приймається як величина сили різання.

Даний підхід передбачає, що сила різання є величиною періодичною і стаціонарною. Такі припущення з деяким наближенням можуть бути використані для моделювання динамічного стану фрези тільки при відрізання заготовок типу пластин при їх симетричному розміщенні відносно осі фрези. Якщо розглядати відрізання в цілому, то в будь-якому випадку процес є нестационарним вже завдяки наявності зон врізання і виходу інструменту, тому у випадку відрізання заготовок довільних профілів сила різання є періодичною нестационарною величиною.

Прийнята методика також не враховує впливу на динаміку сили різання геометрії різальної частини відрізної фрези, крім нерівномірності кроку, хоча теоретичними дослідженнями встановлено, що фрези з нахиленим зубом мають кращі динамічні характеристики [1].

Виконавчий модуль `vs_plast.exe` шляхом розкладання обчисленої часової залежності збуджуючої сили в ряд Фур'є по 99 гармоніках визначає спектр збуджуючої сили і, використовуючи результати роботи першого модуля, за формулою (1) обчислює масив амплітуд вимушених коливань. Весь масив виводиться в текстовий файл.

Тому робота третього виконавчого модуля полягає в пошуку в даному текстовому файлі максимального за абсолютною величиною значення амплітуди вимушених коливань, яке приймається як критерій динамічного стану відрізної фрези.

Таким чином нове програмне забезпечення повинне включати в себе: теоретичний розрахунок сили різання при відрізання заготовок довільного профілю інструментом з довільною геометрією різальної частини; визначення власних частот відрізної фрези; амплітудно-частотний аналіз збуджуючої сили; розрахунок амплітуд вимушених коливань і визначення коефіцієнта динамічної стійкості фрези. Поряд з цим програма повинна мати розвинений інтерфейс, який буде зручним

в користуванні, забезпечить наочне відтворення процесу обчислень, керуваність процесу, функції зберігання і відтворення інформації в цифровому, текстовому і графічному видах.

Основна частина. На виконання поставленої задачі нами розроблено комплекс програмних засобів, який дозволяє досліджувати динамічний стан відрізної фрези в умовах роботи, максимально наближених до реальних.

Для визначення критерію динамічної стійкості відрізної фрези за формулою (1) необхідна наявність даних у вигляді трьох масивів:

– масив значень гармонік збуджуючої сили (сили різання)

$$\mathbf{P}_R = \{p_j\}, \text{ де } j = \overline{0, J};$$

– масив амплітуд відповідних гармонік збуджуючої сили

$$\mathbf{C} = \{C_j\}, \text{ де } j = \overline{0, J};$$

– масив власних частот відрізної фрези

$$\mathbf{\Omega} = \{\omega_i\}, \text{ де } i = \overline{1, I}.$$

Існує програма розрахунку теоретичного значення сили різання при відрізання фрезами [5]. Програма дозволяє отримати в табличному вигляді теоретичні залежності складових сили різання як функцій часу протягом всього процесу відрізання заготовки, від врізання до повного виходу інструменту. При цьому сила різання виступає в ролі комплексного показника, в розрахунках якого враховуються всі геометричні параметри різальної частини фрези, форма профілю і механічні властивості матеріалу заготовки, режими різання. Результати розрахунку одержуються методом імітаційного моделювання процесу відрізання заготовки довільного перерізу дисковою фрезою довільної конструкції і зберігаються у вигляді бінарного файлу. Файл являє собою двомірний масив даних, кожний рядок якого містить результати розрахунку інтегральних значень складових сили різання у форматі: кругова складова P_O (тип double), радіальна складова P_r (тип double), аксіальна (осьова) складова P_a (тип double), складова сили різання за напрямом подачі P_s (сила подачі) (тип double), складова сили різання перпендикулярна до напрямку подачі в площині фрези P_n (сила відтискання) (тип double), поточна координата центра фрези $x_{Ц}(t_j)$ (тип double), поточний момент модельного часу t_j (тип double).

Дана інформація використовується як вхідна інформація для амплітудно-частотного аналізу збуджуючої сили. Програмний модуль амплітудно-частотного аналізу зчитує з бінарного файлу масиви

значень сили подачі P_{sn} , сили відтискання P_{n_n} і поточного модельного часу t_n . Оскільки відповідно до теоретичних положень збуджуюча сила діє в площині фрези, то вона визначається як рівнодійна сил $P_s(t)$ і $P_n(t)$. В результаті одержується деякий масив значень функції

$$y_n = \sqrt{P_{sn}^2 + P_{n_n}^2}, \text{ де } n = 1 \dots N.$$

Для визначення амплітуд і частот збуджуючої сили, заданої таблично парами величин t_n і y_n виконується її апроксимація рядом Фур'є [6]

$$f_R(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^J a_j \cos j\rho_0 t + \sum_{j=1}^J b_j \sin j\rho_0 t.$$

Якщо масив значень функції збуджуючої сили містить N елементів, то одержується ряд, розвинений до J -ї вищої гармоніки, де

$$J = \frac{N-1}{2}.$$

Загальний час вимірювання рівний значенню t_N . Кругова частота основної гармоніки рівна $\rho_0 = 2\pi/t_N$. Частотний діапазон спектра при цьому від 0 до $\rho_0 J$ рад/с.

Коефіцієнти ряду Фур'є визначаються за формулами:

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cos j\rho_0 t_n,$$

$$\text{де } j=0 \dots J; b_j = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n \sin j\rho_0 t_n, \text{ де } j=1 \dots J.$$

Із одержаних масивів значень коефіцієнтів ряду a_j і b_j визначається масив амплітуд гармонік збуджуючої сили

$$C_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}, \text{ де } j=1 \dots J.$$

Для розрахунку власних частот фрези використовується напіваналітичний метод визначення власних форм і власних частот круглої кільцевої пластини [4]. Він дозволяє визначити 17 власних форм і частот, яких цілком достатньо для нашої задачі. Метод реалізовано у вигляді існуючого виконавчого модуля R_n_s.exe. Даний модуль буде розглядатися нами і використовуватись у вигляді "чорного ящика", для якого відомі формат і об'єм вхідної і вихідної

інформацій. Ввід інформації для роботи програми виконується вручну з клавіатури в інтерактивному режимі, або в пакетному режимі із заздалегідь підготовленого текстового файлу. Вивід результатів обчислень здійснюється в текстовий файл *Sob_numb*.

Модуль розрахунку критерію динамічної стійкості зчитує масив значень власних частот ω_i з текстового файлу. За формулою (1) обчислюється двомірний масив значень B_{ij} амплітуд вимушених коливань фрези і виконується пошук в ньому елемента, який має максимальне за абсолютною величиною значення. Це значення приймається як критерій динамічної стійкості відрізної фрези

$$C_{r \max} = \max(|B_{ij}|), \text{ де } i = 1 \dots I \text{ і } j = 1 \dots J.$$

Вважається, що динамічна стійкість фрези в процесі відрізання буде тим вища, чим менше значення параметра $C_{r \max}$.

На рис. 1 зображено головне вікно програми. Робоче поле розділено на три частини. В верхній частині знаходиться діаграма, в якій зображується графік часової реалізації збуджуючої сили. Посередині вікна знаходиться діаграма із зображенням спектра збуджуючої сили. Внизу вікна розміщена таблиця, в якій виводяться на екран результати розрахунку амплітуди вимушених коливань — 25 найбільших значень в порядку спадання. Надлишковість інформації дозволяє оцінити глибше динаміку вимушених коливань на інших частотах.

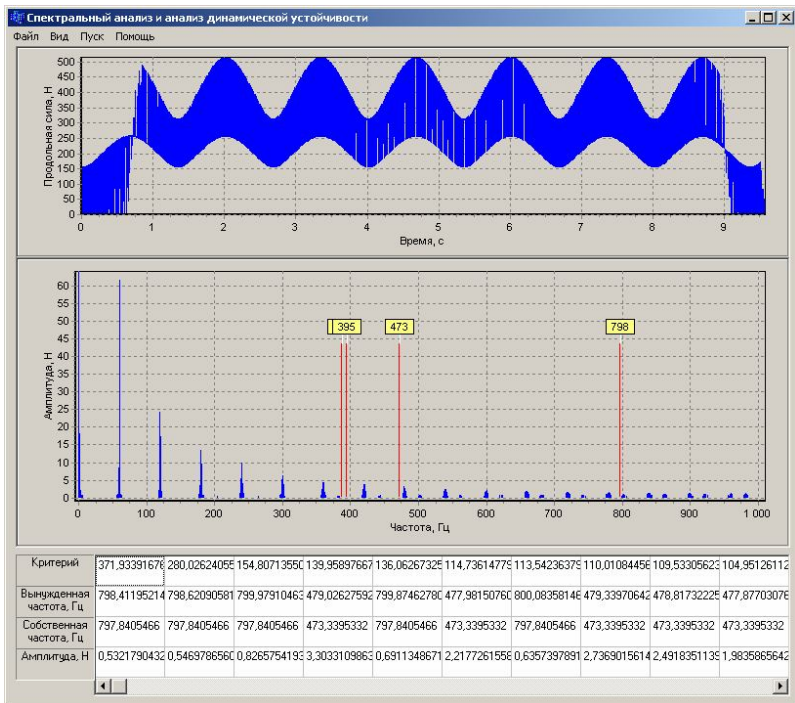


Рис. 1. Видяг головного вiкна програми динамiчного аналізу

На кожному з графiкiв можна зробити масштабування зображення i перемiщення по екрану, щоб оцiнити характер кривої на окремих дiлянках (рис. 2).

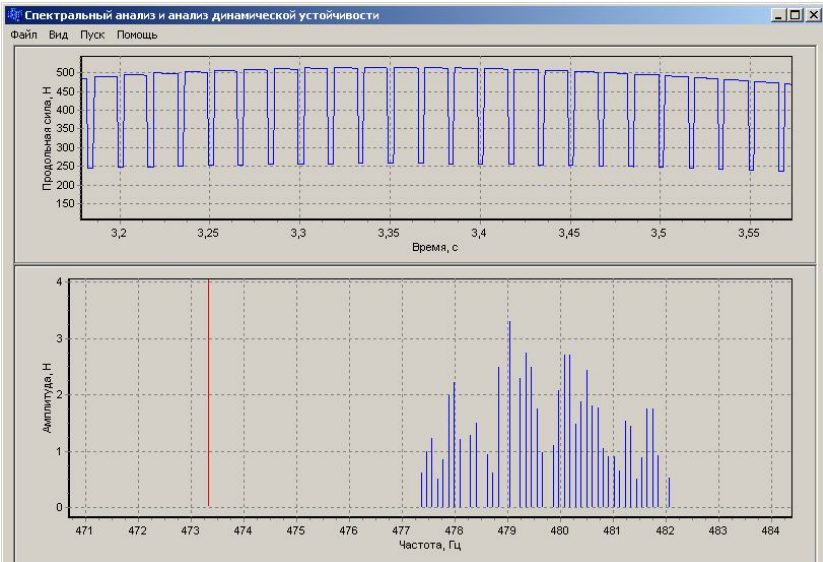


Рис. 2. Масштабування і переміщення графіка

Керування ходом розрахунків і візуалізації результатів виконується за допомогою трьох підменю командного меню (рис. 3):

- підменю «Файл» — містить команди для організації роботи з файлами даних і результатів розрахунків;
 - «Очистить» — виконує очищення даних в пам'яті і на екрані;
 - «Загрузить данные реализации ...» — команда відкриває діалогове вікно для пошуку і вибору файла даних, які будуть завантажені і відображені на діаграмі часової реалізації, в форматі результуючого файла програми розрахунку теоретичного значення сили різання при відрізання фрезами;
 - «Загрузить данные спектра ...» — команда відкриває діалогове вікно для пошуку і вибору файла даних, які будуть завантажені і відображені на діаграмі спектра;
 - «Загрузить собственные частоты ...» — команда відкриває діалогове вікно для пошуку і вибору файла даних з власними частотами, які будуть завантажені і відображені на діаграмі спектра;
 - «Импорт реализации ...» — команда відкриває діалогове вікно для пошуку і вибору різного типу файлів даних, які будуть завантажені і відображені на діаграмі часової реалізації;

- «Импорт спектра ...» — команда відкриває діалогове вікно для пошуку і вибору різного типу файлів даних, які будуть завантажені і відображені на діаграмі спектра;
- «Экспорт реализации ...» — команда відкриває діалогове вікно для запису в різному форматі файлів даних діаграми часової реалізації;
- «Экспорт спектра ...» — команда відкриває діалогове вікно для запису в різному форматі файлів даних діаграми спектра;
- «Сохранить критерий ...» — команда відкриває діалогове вікно для запису в файл результатів розрахунку критерію динамічної стійкості;
- «Выход» — завершення роботи програми;
- підменю «Вид» — містить команди для контролю за відображенням інформації на екрані;
 - «Реализация» — включає або виключає відображення графіка реалізації на діаграмі реалізації;
 - «Ряд Фурье» — включає або виключає відображення графіка ряду Фур'є на діаграмі реалізації;
 - «Собственные частоты» — включає або виключає відображення власних частот на діаграмі спектра;
 - «Фильтр по амплитуде» — дозволяє встановити нижнє граничне значення для амплітуди гармонік, які включаються до спектра;
- підменю «Пуск» — містить команди запуску окремих розрахунків;
 - «Преобразование в ряд Фурье» — запуск перетворення Фур'є для даних часової реалізації;
 - «Обратное преобразование» — відтворення гармонічної функції за даними спектра. Дозволяє співставити її з даними часової реалізації, наприклад після фільтрації;
 - «Расчет критерия дин. устойч.» — запуск розрахунку вимуваних частот і вивід результатів в таблицю.

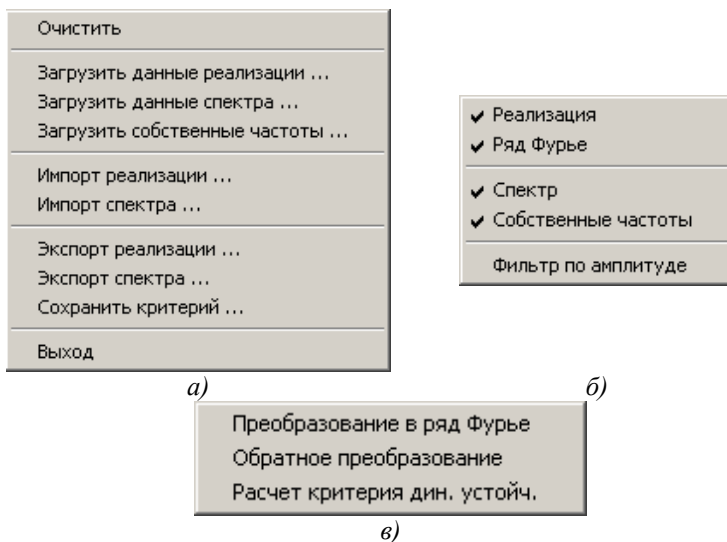


Рис. 3. Підменю головного меню:

а) підменю «Файл»; б) підменю «Вид»; в) підменю «Пуск»

Розвинений інтерфейс дозволяє виконувати експорт даних діаграм в різних форматах:

- «Enhanced Metafile (EMF)», «Windows Metafile (WMF)» — 32- і 16-розрядної векторної графіки;
 - «Bitmap (BMP)» — растрової графіки;
 - «Text File (TXT)» — у вигляді текстового файлу;
 - «Binary File (BIN)» — у вигляді файлу даних у двійковому виді;
 - «*.TEE file (TEE)» — спеціальний формат для зберігання діаграм;
- і імпорт даних діаграм в форматах «Text File (TXT)», «Binary File (BIN)», «*.TEE file (TEE)».

Висновки. Таким чином, розроблена програма динамічного аналізу процесу фрезерування відрізними фрезами і пилами за критерієм динамічної стійкості фрези, яка оснащена сучасним віконним інтерфейсом, володіє широкими можливостями з керування ходом обчислень і візуалізації обчислень, дозволяє виконувати ввід і вивід інформації в зручному для наступного використання виді. Програма є універсальна і може бути використана в інших прикладних задачах для виконання амплітудно-частотного аналізу процесів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Дисковые пилы с неравномерным шагом [Текст]: Монография / П.Р. Родин, Н.С. Равская, А.Е. Бабенко, О.А. Боронко. — К. : НТУУ “КПИ”, 2008. — 216 с.
2. Бабенко А.Є. Про вплив на коливання фрез кута нахилу зубців / А.Є. Бабенко, Н.С. Равська, О.О. Боронко, В.С. Парненко // Вісник ЖІТІ. — 2000. — № 12 — С. 49–54.
3. Боронко О.О. Метод розрахунку вібраційних процесів машинобудівних конструкцій: Дис... докт. техн. наук: 05.02.09. — К., 2003. — 267 с.
4. Бабенко А.Е. Полуаналитический метод определения собственных форм и собственных частот круглой кольцевой пластинки / А.Е. Бабенко, Н.С. Равская, О.А. Боронко // Вестник НТУУ “КПИ” / Машиностроение. — 2004. — № 45. — С. 11–12.
5. Панчук В.Г. Комп’ютерна реалізація розрахунку теоретичного значення сили різання при відрізанні фрезами // Прогресивні технології і системи машинобудування. — 2008. — № 36. — С. 146–154.
6. Шрюфер Е. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизованных сигналов: Підруч. для техн. спец. вузів / За ред. В.П. Бабака; Пер. з нім. В.П. Бабак, Г.В. Юхименко. — К. : Либідь, 1992. — 296 с.

РУБЛЮК Ольга Валеріївна — кандидат технічних наук, доцент, докторант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- теорія проектування інструменту.

ПАНЧУК Віталій Георгійович — кандидат технічних наук, доцент, докторант Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- теорія проектування інструменту.

Подано 27.01.2009