

## Ідентифікація динамічних характеристик технологічної обробної системи

Ю.В. Петраков, О.А. Охріменко, М.О. Сікайло

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**Анотація.** Представлена методика експериментального визначення динамічних характеристик технологічної обробної системи з урахуванням узагальненої структурної схеми процесу. Еквівалентна пружна система, що знаходиться під дією силового збурення, може бути представлена у вигляді одномасової моделі з двома чи трьома степенями рухомості. Математична модель має містити три основних параметри: частота власних коливань, жорсткість і коефіцієнт затухання коливань, які визначаються експериментально. Представлений приклад ідентифікації для операції кінцевого фрезерування на вертикально-фрезерному верстаті 6М13. Створений стенд містить багатокомпонентний датчик MCS10-005-3С, підсилювачі сигналу СірХ ВМ40 і комп'ютер зі спеціальним інтерфейсом і дозволяє визначити жорсткість за результатами вимірів «навантаження – зсув». Для визначення частоти власних коливань використовується сигнал у вигляді імпульсної реакції зі спеціального молотка Impact Hammer фірми PCD Piezotronics, під'єданого до запам'ятовуючого осцилографу. Під час експерименту створюється файл у форматі Excel, що за допомогою стандартних перетворень Фур'є представляється у вигляді амплітудно-частотної характеристики. Отриманий спектр апроксимується типовою амплітудно-частотною характеристикою коливальної ланки, звідки визначається частота власних коливань.

**Ключові слова:** динаміка обробної системи, імпульсна характеристика, частота власних коливань.

Застосування нових інструментальних матеріалів, швидкодіючих систем управління і приводів верстатів з ЧПК створює нові умови для підвищення продуктивності оброблення деталей різанням. В той ж час головним стримуючим фактором стають динамічні процеси, що провокують виникнення вібрацій і можуть привести до втрати сталості. Будь-який процес різання відбувається в замкненій обробній технологічній системі (ТОС) якість функціонування якої залежить від її динамічних характеристик [1] (рис. 1).

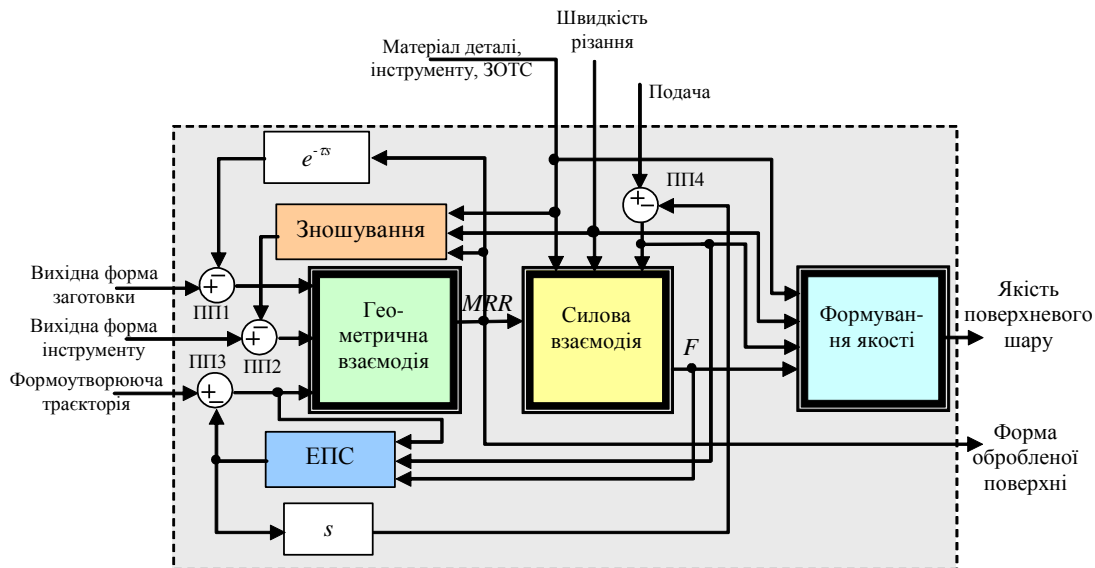


Рис. 1. Узагальнена модель процесу обробки різанням

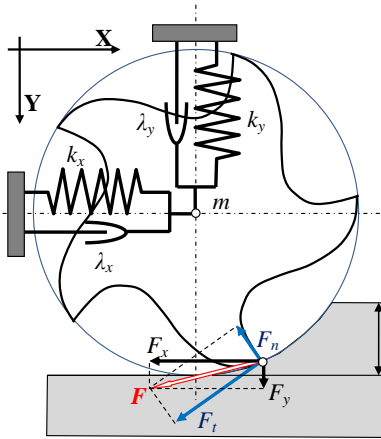
Формування оброблюваної поверхні здійснюється при геометричній взаємодії інструменту і заготовки, яке визначається швидкістю зрізування припуску (Material Removal Rate –  $MRR$ ), внаслідок чого виникає сила  $F$  різання, яка в наслідок замкненості процесу впливає на вихідні

умови і параметри оброблення. Такий вплив представлений на схемі рис. 1 у вигляді зворотних зв'язків з порівняльними пристроями (ПП1, ПП2, ПП3 і ПП4). Отже, в процесі виконання технологічної операції еквівалентна пружна система (ЕПС) знаходиться під дією як кінематичного, так і силового збурення. Крім того, головним чинником виникнення регенеративних коливань є оброблення за слідом, яке відображається на схемі функцією запізнюючого аргументу  $e^{-\tau s}$ , де  $\tau$  – час одного проходу,  $s$  – оператор Лапласа.

Головною метою є оброблення заданої поверхні за мінімальний час при безумовному виконанні обмежень за якістю і умов виконання процесу певним інструментом на певному верстаті. Для досягнення мети необхідно урахувувати характеристики процесу і прогнозувати його перебіг у часі. Особливо важливі динамічні характеристики ТОС, оскільки прагнення підвищувати продуктивність оброблення пов'язане з необхідністю підвищувати швидкості різання і формоутворення. Тому наразі особлива увага приділяється динамічним характеристикам ТОС і визначенню безвібраційних режимів і умов різання [2].

Більшість дослідників динамічних явищ, що виникають при різанні, представляють динамічну систему у вигляді одномасової моделі з двома чи трьома степенями вільності [3]. На рис. 2 представлена модель процесу кінцевого фрезерування у вигляді одномасової системи з двома ступенями вільності.

Рух такої моделі описується системою диференціальних рівнянь:



$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda_x \frac{dx}{dt} + k_x x = F_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda_y \frac{dy}{dt} + k_y y = F_y \end{cases}, \quad (1)$$

де  $m$  – приведена маса,  $\lambda_x, \lambda_y$  – коефіцієнти в'язкого тертя,  $k_x, k_y$  – жорсткості,  $F_x, F_y$  – складові сили різання.

Таким чином, для ідентифікації такої динамічної моделі необхідно визначити наведені вище параметри системи.

Рис. 2. Динамічна модель кінцевого фрезерування

Проте, застосування в рівняннях руху таких параметрів, як приведена маса  $m$  і коефіцієнт  $\lambda$  в'язкого тертя, які важко визначити на практиці і зв'язати з реальними фізичними параметрами системи, заважають створенню адекватної моделі. Тому пропонується використовувати іншу форму представлення рівнянь руху:

$$\begin{cases} \frac{s^2 x}{(\omega_0)_x^2} + \xi_x \frac{sx}{(\omega_0)_x} + x = \frac{1}{k_x} F_x \\ \frac{s^2 y}{(\omega_0)_y^2} + \xi_y \frac{sy}{(\omega_0)_y} + y = \frac{1}{k_y} F_y \end{cases}, \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – частота власних коливань,  $\xi$  – коефіцієнт затухання коливань.

Таким чином, для ідентифікації такої динамічної системи достатньо визначити три параметри: частоту власних коливань, жорсткість і коефіцієнт затухання коливань за кожною віссю ТОС. Такі параметри визначаються експериментально із застосуванням спеціального обладнання і методик вимірювань. На рис. 3 показана експериментальна установка для

ідентифікації динамічних характеристик ТОС вертикально-фрезерного верстату мод. 6М13. Представлена наладка вимірювань жорсткості для виконання операції кінцевого фрезерування заготовки 1 фрезою 2 (Ø12 мм, 4 зуба, кут нахилу спіралі 30°). Заготовка 1 встановлена на столі багатокомпонентного датчика 3 MCS 10-005-3С фірми НВМ (Germany), приєднаного до підсилювачів 4 SlipX BM40 також фірми НВМ (Germany). Сигнали фіксуються в персональному комп'ютері 5 за допомогою спеціального інтерфейсу.

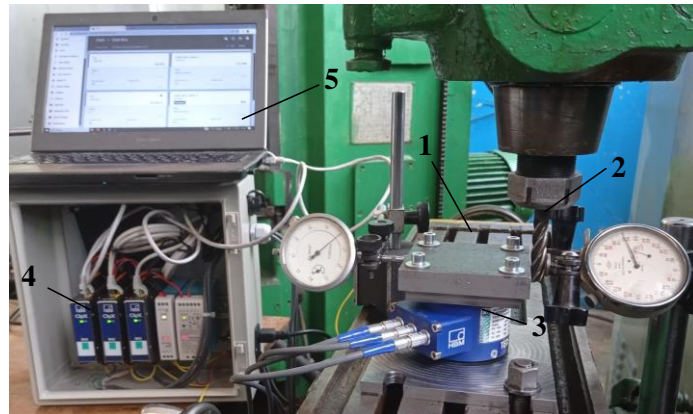


Рис. 3. Експериментальний стенд

Для вимірювання жорсткості використовуються два індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм. Заготовка підводиться до контакту з фрезою, виставляються нульові значення на індикаторах і на інтерфейсі комп'ютера, переміщенням стола в напрямку координати створюється певне навантаження, величина якого визначається за інтерфейсом комп'ютера і фіксується зсуви показників індикаторів. Загальний зсув  $\delta$  дорівнює сумі показників двох індикаторів, а жорсткість визначається як відношення:  $k_y = F/\delta$ , де  $F$  – величина сили, що визначається за інтерфейсом комп'ютера.

Для визначення частоти власних коливань використовується ударний молоток Impact Hammer Model 086C03 фірми PCB Piezotronics Inc. (USA) (рис. 4).

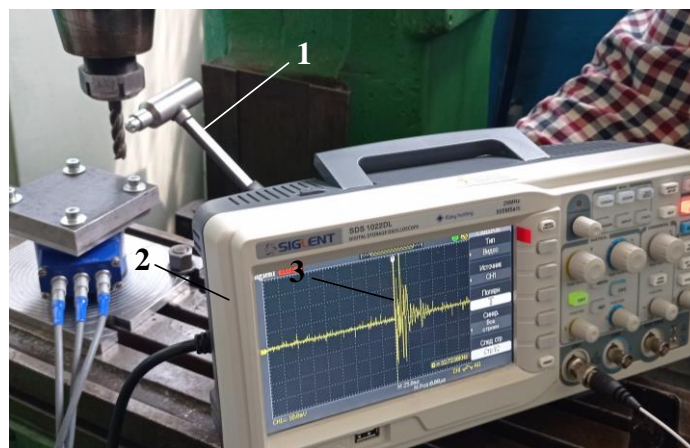


Рис. 4. Вимірювання імпульсної характеристики

Вихідний кабель молотка під'єднаний до входу осцилографа 2 з функцією фіксації імпульсного сигналу 3, що з'являється на екрані при нанесенні удару по елементам ТОС – в даному випадку удар наносився в напрямку координатної вісі по фрезі. Сигнал представляє

реакцію системи на імпульс і може бути збережений у вигляді файлу формату Excel. Для перетворення сигналу Impulse Response Function, який представляється у часі в амплітудно-частотну характеристику у функції частоти використовується стандартні перетворення Фур'є. На рис. 5 представлений сигнал імпульсної характеристики і перетворена амплітудно-частотна характеристика. Спектр представляється в інтерактивному вікні, де при переміщенні мишки (на рис. 5 – перехрестя мишки – курсор) у вікнах з'являється інформація про номер гармоніки і її частоту.

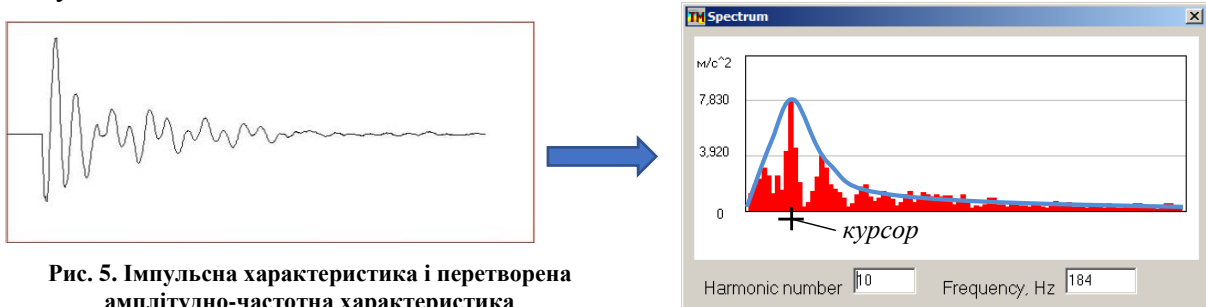


Рис. 5. Імпульсна характеристика і перетворена амплітудно-частотна характеристика

Отриманий спектр має декілька піків, що свідчить про багатомасову динамічну систему. Ураховуючи, що динамічна система первинно представлена у вигляді одномасової моделі, отриманий спектр апроксимується типовою характеристикою коливальної ланки, де і визначається частота власних коливань, що має застосовуватись при моделюванні динамічної частини ТОС у відповідності до (2).

Висновок. Запропонована методика ідентифікації динамічних характеристик ТОС є одним з найважливіших етапів визначення діаграм сталості будь-якого процесу різання, що забезпечить призначення безвібраційного режиму оброблення з максимальною продуктивністю.

### Список літератури

- [1] Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: Навчальний посібник + CD Міністерство освіти і науки України, Київ 2004.-384 с. <http://tm-mmi.kpi.ua>
- [2] Tlusty J. Manufacturing Processes and Equipment, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 1st edition. 2000. 928 p. doi: <https://doi.org/10.1080/10940340008945713>
- [3] Yue C., Gao H., Liu X., Liang S., Wang L. A review of chatter vibration research in milling // Chinese Journal of Aeronautics, (2019), 32(2): pp.215–242. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.11.007>

## Identification of the dynamic characteristics of the technological machining system

Y.V. Petrakov, O.A. Ohrimenko, M.O. Sikailo

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The method of experimental determination of the dynamic characteristics of the technological machining system, taking into account the generalized structural scheme of the process, is presented. An equivalent elastic system under the influence of a force disturbance can be represented as a one-mass model with two or three degrees of freedom. The mathematical model should contain three main parameters: frequency of natural oscillations, stiffness and damping coefficient of oscillations, which are determined experimentally. An example of identification for the end milling operation on the 6M13 vertical milling machine is presented. The created stand contains a multi-component MCS10-005-3C sensor, ClipX BM40 signal amplifiers and a computer with a special interface and allows you to determine stiffness based on the results of "load-displacement" measurements. To determine the frequency of self-oscillations, a signal in the form of an impulse response is used from a special PCD Piezotronics Impact Hammer connected to a storage oscilloscope. During the experiment, a file is created in Excel format, which is presented in the form of an amplitude-frequency characteristic using standard Fourier transforms. The obtained spectrum is approximated by the typical amplitude-frequency characteristic of the oscillating link, from which the frequency of natural oscillations is determined.

**Keywords:** dynamics of the machining system, impulse response, frequency of self-oscillations