

УДК 62-50:658.564:621.924...

Цифрове моделювання процесу циліндричного фрезерування кінцевими фрезами

Петраков Ю.В.; Сікайло М.О.

КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

***Анотація.** Будь-який процес різання супроводжується коливаннями, які можуть привести до погіршення якості обробки і навіть до втрати сталості процесу. Математичне моделювання допомагає розв'язувати проблеми вибору режиму різання, що забезпечує безвібраційне оброблення. Розроблена математична модель ураховує замкненість процесу різання і оброблення «за слідом», що представляється структурною схемою зі зворотними зв'язками і функцією запізнюючого аргументу. Динамічна модель технологічної обробної системи представлена одномасовою з двома ступенями вільності. Розроблена структурна схема системи разом з чисельними алгоритмами вирішення геометричної взаємодії зуба фрези з заготовкою та чисельними методами інтегрування диференціальних рівнянь покладені в основу створеної прикладної програми цифрового моделювання процесу. Результати моделювання свідчать про адекватну реакцію програми в цілому, що дозволяє прийняти запропоновану методику за основу подальшого удосконалення віртуального дослідження процесу і передбачення його реальних властивостей.*

***Ключові слова:** Циліндричне фрезерування, кінцева фреза, цифрове моделювання.*

Наразі математичне моделювання являє собою потужний інструмент вивчення та дослідження складних процесів та об'єктів. Математичне моделювання дозволяє без суттєвих витрат вивчити поведінку об'єкту чи процесу, що моделюються і прийняти оптимальне рішення з його управління. В такому випадку, при забезпеченні адекватності математичної моделі можуть бути вирішені такі складні задачі динаміки процесу оброблення різанням, зокрема при кінцевому фрезеруванні.

Відомо, що будь-який процес різання супроводжується коливаннями, які можуть привести до погіршення якості обробки і навіть до втрати сталості процесу [1]. Математичне моделювання допомагає розв'язувати і такі складні проблеми, що обумовлені динамічними процесами. При цьому адекватність моделі забезпечується адекватністю її структури та її параметрів. Перше пов'язано з використанням системного підходу в уявленні процесу різання таким, що відбувається в замкненій технологічній обробній системі (ТОС) з обов'язковим урахуванням оброблення «за слідом» [2]. Це означає, що коливання ТОС викликають спотворення форми припуску, який буде зрізуватись на наступному проході різального елемента [3]. Оскільки спотворення виникло в результаті коливань ТОС, слід очікувати, що частота коливань на поверхні припуску буде відповідати частоті власних коливань, або частоті головної гармоніки ТОС [4].

Процес математичного моделювання можна умовно розбити на три етапи: розробка структури моделі, вибір алгоритму, створення програми. Таким чином, теоретичні методи, що дозволяють визначити поведінку реального процесу мають проводитись на комп'ютері із застосуванням чисельних алгоритмів, отже завжди в такому разі йдеться про цифрове моделювання.

Динамічна модель ТОС при циліндричному фрезеруванні кінцевою фрезою у першому наближенні може бути представлена одно масовою системою з двома степенями вільності (рис.1).

Приведена маса m_{np} визначається за динамічними випробуваннями реальної системи. Технологія таких випробувань представлена в роботі [4] і полягає у визначенні частоти головної гармоніки за кожною координатою. Після вимірювань жорсткостей за цими осями координат стандартним методом можна визначити величину приведеної маси:

$$m_{np} = \frac{k}{\omega^2}, \quad (1)$$

де k – жорсткість (Н/м), ω - кругова частота головної гармоніки (рад/с).

Ураховуючи, що жорсткості за осями координат, як правило, відрізняються, то в рівняннях руху такої динамічної моделі мають використовуватись дві приведені маси. Математична

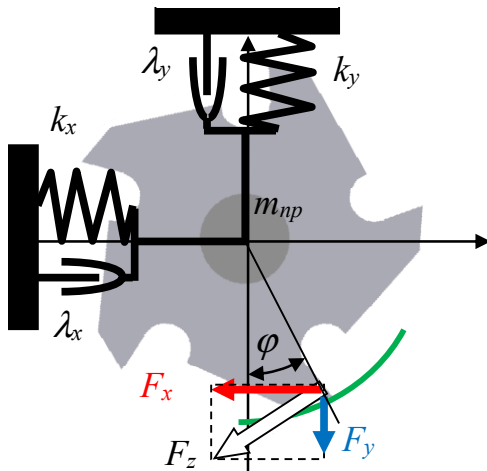


Рис. 1. Динамічна модель

модель руху для використання чисельних процедур інтегрування (наприклад Рунге-Кутта четвертого порядку) має бути представлена в змінних стану, як система двох диференціальних рівнянь, кожна другого порядку:

$$\begin{cases} sx[1] = (F_x - \lambda_x \delta x[1] - k_x \delta x[2]) / m_x \\ sx[2] = \delta x[1] \\ sy[1] = (F_y - \lambda_y \delta y[1] - k_y \delta y[2]) / m_y \\ sy[2] = \delta y[1] \end{cases}, \quad (2)$$

де δx , δy – масиви змінних стану системи, sx , sy – масиви перших похідних.

Сила різання F_z впливає за кожною віссю своїми складовими F_x та F_y , які визначаються за наступними рівняннями:

$$F_z = C_p (H_z)^{ka} B k_v, \quad F_x = F_z \cos(\varphi + \gamma), \quad F_y = F_z \sin(\varphi + \gamma), \quad (3)$$

де C_p , k_v , ka , – емпіричні коефіцієнти і показник ступеня, H_z , B – глибина і ширина різання, γ – передні кут на зубі фрези.

На етапі розроблення структури моделі зручно скористатися передатними функціями динамічної частини ТОС, а взаємодію змінних відображати за визначеннями структурних схем [5] (рис.2).

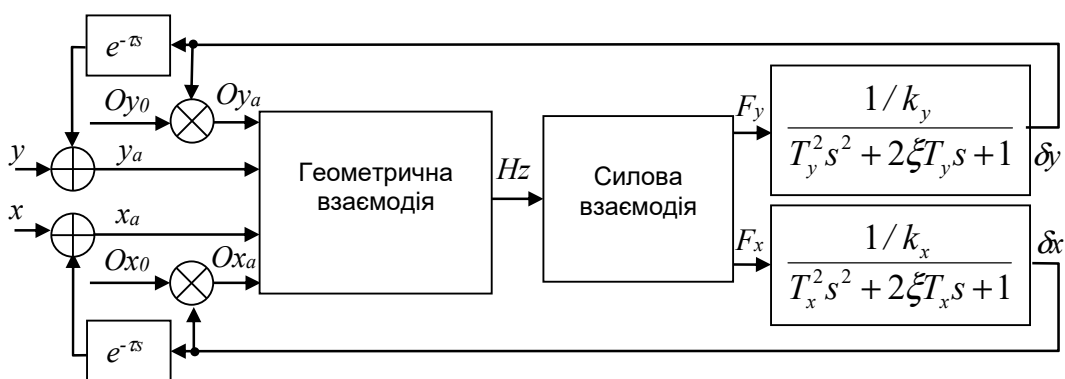


Рис. 2. Структурна схема процесу фрезерування

На структурній схемі замкненість процесу різання за кожною координатою відображається порівняльними пристроями:

$$Ox_a = Ox_0 - \delta x, \quad Oy_a = Oy_0 - \delta y, \quad (4)$$

де Ox_0, Oy_0 – початкове положення вісі фрези, Ox_a, Oy_a – актуальне положення вісі фрези в процесі різання.

Оброблення за слідом відтворюється за наступними зв'язками структурної схеми:

$$x_a = x + \delta x(1 - e^{-s\tau}), \quad y_a = y + \delta y(1 - e^{-s\tau}), \quad (5)$$

де τ – час між двома сусідніми проходами зуба фрези за поверхнею різання, s – оператор Лапласа.

Розроблена математична модель покладена в основу створеної прикладної програми цифрового моделювання кінцевого фрезерування. Задача визначення геометричної взаємодії вирішується на кожному кроці моделювання за спеціальним чисельним алгоритмом [6], що дозволяє визначати глибину різання як різницю координат поверхні різання, що була утворена до проходу зубом фрези і під час проходу. Ураховуючи високу частоту головної гармоніки ТОС при кінцевому фрезеруванні (за попередніми експериментами приблизно 500 Гц) моделювання виконувалось з кроком за часом 0,00002с. Такі обставини затримують процес і вимагають процесорів з більш високою тактовою частотою.

На рис.3 представлені результати моделювання процесу з наступними вихідними даними: жорсткості за осями $k_x=15000\text{Н/мм}$, $k_y=16000\text{Н/мм}$, приведені маси 1,2кг і 1,3 кг відповідно. Режим різання: швидкість 60м/хв, подача 400 мм/хв, фреза $\varnothing 20\text{мм}$, $z=5$, матеріал заготовки – Сталь 40Х.

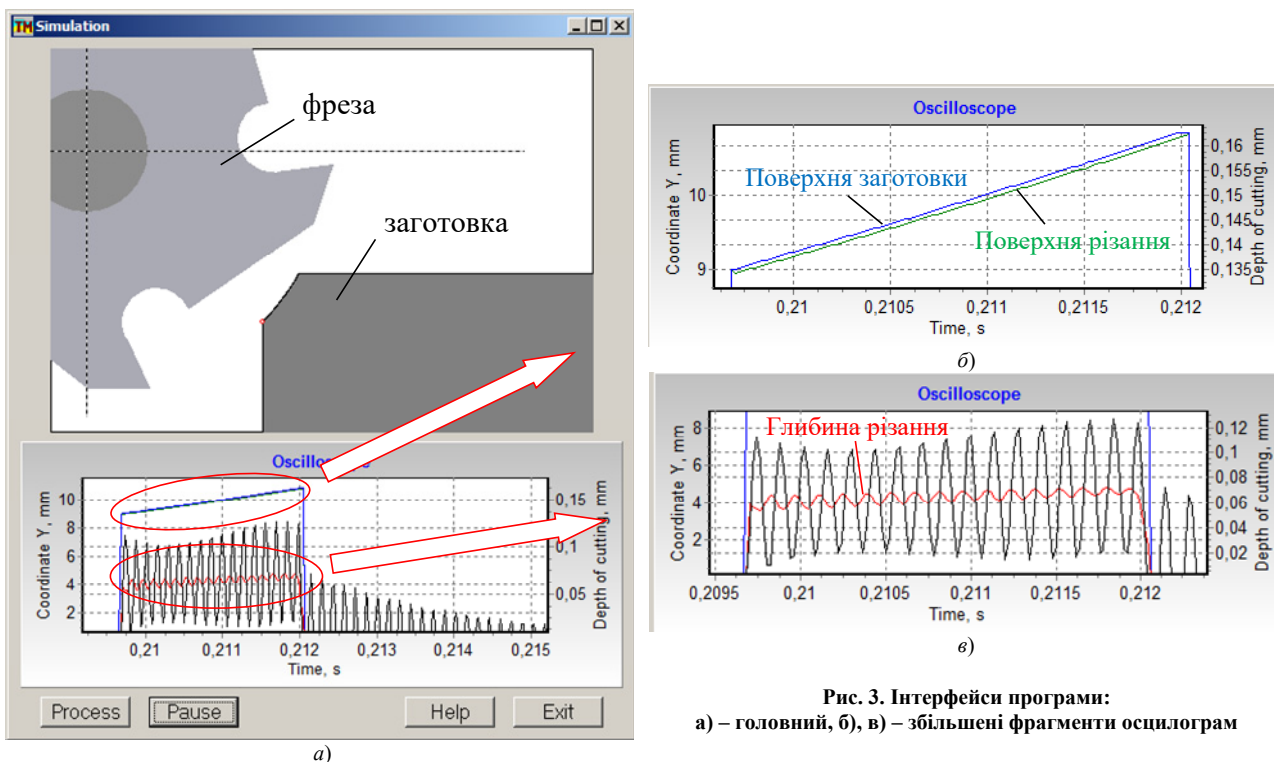


Рис. 3. Інтерфейс програми:
а) – головний, б), в) – збільшені фрагменти осцилограм

Видно, що процес різання супроводжується коливаннями, які, в свою чергу, викликають коливання припуску і глибини різання. Це означає вплив оброблення «за слідом», що приводить до поступового збільшення амплітуди коливань (розгойдування системи) до кінця різання одним зубом фрези.

Висновки. Розроблена математична модель процесу циліндричного фрезерування кінцевими фрезами, що ураховує динамічну модель технологічної обробної системи як одномасову з двома ступенями вільності дозволяє виконувати цифрове моделювання і забезпечує

адекватну реакцію на процес різання, що моделюється. Вона може бути основою для подальшого вдосконалення моделі на підставі експериментальних досліджень, а створене програмне забезпечення в своєму розвитку стане дієвим інструментом дослідження процесу з метою визначення оптимальних та безвібраційних режимів оброблення.

Список літератури

1. Petrakov Y. V. Chatter suppression technologies for metal cutting // *Mechanics and Advanced Technologies* #2 (86), 2019. – С. 51-60.
2. Altintas, Y., *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2012: Cambridge university press. 366 p.
3. Yue, C., Gao, H., Liu, X., Liang, S. and Wang, L. (2019). A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 2, no. 32. pp. 215 – 242 pp.
4. Y. Petrakov, M. Danylchenko, A. Petryshyn Prediction of Chatter Stabelity in Turning // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* #5/1 (101) 2019 58-64pp.
5. Сікайло М.О., Петраков Ю.В. Причини виникнення коливань при фрезеруванні // *Збірка Інновації молоді в машинобудуванні* №3, 2021, с.415-419.
6. Петраков Ю.В. *Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія.* – К.: Січкар, 2011.- 220 с.

Digital simulation cylindrical milling process with end mills

Yuri Petrakov, Maksim Sikailo

Abstract. Any cutting process is accompanied by vibrations that can lead to a chatter of machining surface and even to a loss of stability. Mathematical modeling helps to solve such problems of the choice of cutting mode that provide vibration-free machining. The developed mathematical model takes into account the closed of the cutting process and machining "on the trail", which is implemented in its structural diagram representing the process, feedbacks and a function of a delay argument. The dynamic model of a technological machining system is represented by a single-mass model with two degrees of freedom. The developed block diagram of the system together with numerical algorithms for solving the geometric intersection of the cutter tooth with the workpiece and the numerical method of integrating differential equations form the basis of the created application program for digital modeling of the process. The simulation results indicate an adequate response of the program as a whole, which allows us to take the proposed methodology as the basis for further improvement of the virtual research process and the prediction of its real properties.

Keywords: Cylindrical milling, end mill, digital simulation.