

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ ТОРЦЕВОЇ ФРЕЗИ
ПРИ ЧИСТОВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

У статті представлена математична модель коливань торцевої фрези при чистовому фрезеруванні та результати її дослідження.

Постановка проблеми. Застосування надтвердих матеріалів для торцевого фрезерування вимагає дотримання жорстких вимог до загального рівня вібрацій при різанні. Це обумовлено низькою стійкістю надтвердих матеріалів до ударних навантажень, згинаючих напружень та напружень на розтяг, а також переважне їх використання при чистовій обробці, коли коливання прямо обумовлюють рівень кінцевої шорсткості обробленої поверхні.

Експериментальне дослідження коливальних процесів при торцевому фрезеруванні, враховуючи його високу вартість та значний діапазон варіювання досліджуваних параметрів, доцільно замінювати імітаційним математичним моделюванням [1–4]. Завдяки розвитку обчислювальної техніки дослідження відповідної моделі процесу дозволяє отримати узагальнюючі залежності основних характеристик процесу обробки та технологічної обробної системи (ТОС), що спрощує кінцеве вирішення поставленої проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний вплив на кінцеву якість обробленої поверхні деталі (перш за все, – шорсткість та хвилястість), продуктивність обробки та стійкість інструментів мають вібрації, що виникають при різанні. Основні причини виникнення первинних коливань розглянуті досить докладно [3–6]. Значно менше досліджені причини та механізм збудження вторинного автоколивального процесу при різанні. Частіше, як найбільш простий випадок, розглядається процес точіння [5–7]. Процес фрезерування, у тому числі торцевого, відрізняється більшою складністю та непостійністю умов – періодичність входу (виходу) різального леза в різання, безперервна зміна перерізу зрізу, кількості різальних лез, що приймають участь у різанні [8–10]. При використанні ступінчастих схем різання до ускладнюючих факторів можна віднести різні навантаження, час і умови роботи окремих різальних лез, складність налагодження і, відповідно, низька прогнозованість реальних процесів, що відбуваються при фрезеруванні.

Дослідження математичної моделі торцевого фрезерування дозволить визначити вплив основних параметрів ТОС на динамічну стабільність процесу різання та допустимі межі їх зміни для досягнення необхідних якості та продуктивності обробки, стійкості фрези.

Мета дослідження. Виконати дослідження умов виникнення поперечних коливань при чистовому торцевому фрезеруванні та визначити основні напрямки підвищення вібростійкості процесу торцевого фрезерування за рахунок зміни конструкції торцевої фрези та умов обробки.

Викладення основного матеріалу. Процес виникнення та підтримки поперечних коливань при торцевому фрезеруванні (автоколивань) може бути відтворений системою нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних із запізненням у часі [3, 10].

На рисунку 1 представлено схему знімання припуску при торцевому фрезеруванні фрезою з 12 ножами, розташованими з однаковим кутовим кроком [8]. Для наочності схеми подача на зуб S_z збільшена (ширина фрезерування прийнята рівною діаметру фрези).

Домінуючою у поперечних коливаннях прийнята система інструмента (шпиндель та торцева фреза) з приведенням маси системи до її вільного кінця. З метою спрощення осі координат y та z вважали незалежними, враховувався лише взаємозв'язок проєкцій сили різання, крутильні коливання не розглядалися.

Система диференціальних рівнянь, яка представляє поперечні коливання фрези в площині YOZ (рис. 1), при торцевому фрезеруванні має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{y} + b \dot{y} + Cy &= F_y^\Sigma \\ m \ddot{z} + b \dot{z} + Cz &= F_z^\Sigma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де m , b , C – інерційний, дисипативний та деформативний коефіцієнти відповідно; F_z^Σ , F_y^Σ – проєкції сили різання на відповідні осі; z , y – амплітуда поперечних коливань фрези за напрямками осей Z та Y .

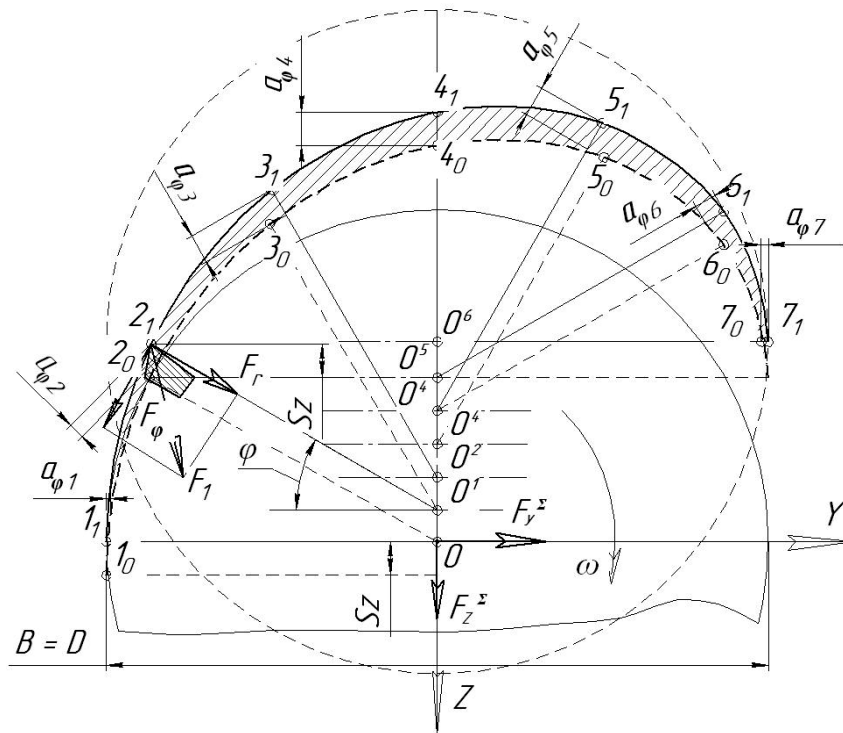


Рис. 1. Схема знімання припуску торцевою фрезою

З врахуванням умов визначення миттєвої товщини зрізу a_ϕ за [3] значення сил, які діють на різальну кромку одного ножа, визначаються за формулами (з врахуванням впливу на товщину зрізу сліду від попереднього ножа фрези та відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізуваного шару):

$$F_\phi = Kb(s_z \sin \omega t + y(x, t - T - \tau) - y(x, t - \tau))^{y_p}; \quad (2)$$

$$F_r = Kb(A_0(s_z \sin \omega t + y(x, t - T - \tau) - y(x, t - \tau))^{y_p} + B_0),$$

де s_z – подача на зуб фрези; t – поточний час; ω – кутова швидкість фрези; T – час вторинного запізнення, який враховує зміну товщини зрізу при обробці за слідом попереднього ножа фрези; τ – час відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізуваного шару.

При роботі наступних ножів фрези змінюється поточний кут фрезерування, відповідно, для торцевої фрези, що має z ножів, складові сили різання, що діють на фрезу можуть бути обчислені за формулами:

$$\begin{aligned} F_z^\Sigma &= R_1(\varphi') \sin \varphi' + R_2(\varphi') \cos \varphi'; \\ F_y^\Sigma &= R_1(\varphi') \cos \varphi' - R_2(\varphi') \sin \varphi', \end{aligned} \quad (3)$$

де $R_1(\varphi')$, $R_2(\varphi')$ – оператори сил F_ϕ та F_r , які становлять (аналогічно [3]):

$$\begin{cases} R_1(\varphi') = Kb(A_0(a(t) + \Delta y + \Delta z)^{y_p} + B_0) \text{ ідè } a(t) > 0; \\ R_1(\varphi') = 0 \text{ ідè } a(t) + \Delta y + \Delta z \leq 0, \\ R_2(\varphi') = Kb(a(t) + \Delta y + \Delta z)^{y_p} \text{ ідè } a(t) > 0; \\ R_2(\varphi') = 0 \text{ ідè } a(t) + \Delta y + \Delta z \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

де $a(t) = a_\phi + y(x, t - T - \tau) - y(x, t - \tau)$ – поточне значення товщини зрізу;

$\Delta y = y(t - T - \tau) \cos \varphi' - y(t - \tau) \cos \varphi'$, $\Delta z = z(t - T - \tau) \sin \varphi' - z(t - \tau) \sin \varphi'$ – поточні значення зміщення осі фрези, які впливають на поточну товщину зрізу $a(t)$.

$$a_\phi = s_z \sin(\omega t - 2\pi(q-1)/z) \text{ ідè } 2\pi k + 2\pi(q-1)/z \leq \omega t \leq 2\pi k + 2\pi(q-1)/z + \varphi_0;$$

$$a_\phi = 0 \text{ ідè } 2\pi k + 2\pi(q-1)/z - \varphi_0 < \omega t < 2\pi(k+1) + 2\pi(q-1)/z + \varphi_0,$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер оберту фрези; $q = 1, 2, \dots$; z – номер зуба фрези; φ_0 – кут контакту фрези з заготовкою (рис. 1), який визначається за формулою:

$$\varphi_0 = 2 \arcsin\left(\frac{B}{D}\right).$$

У наведених виразах для розрахунку поперечних коливань фрези враховувалися запізнення у часі при різанні “по сліду” та відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу, які у першому наближенні прийняті постійними.

Розв’язування системи диференціальних рівнянь (1) для обраних варіантів коефіцієнтів та умов обробки виконано у програмному середовищі *MATCAD* з використанням *Microsoft Excel*. Для ітераційного інтегрування застосовано метод Рунне–Кутта четвертого порядку. Отримані результати за умовами близькими наведеним у [3] підтверджують адекватність моделі.

На рисунках 2, 3 представлені діаграми зміщення фрези по осі z (за схемою, наведеною на рис. 1) для випадку фрезерування стандартною торцевою фрезою з 12 ножами, розташованими з однаковим кутовим кроком. Кут врізання 1 ножа $\varphi_1 = 36^\circ$, кут виходу $\varphi_2 = 166^\circ$ (кожний наступний ніж входить у різання після повороту фрези на 30°). Розглянуто період обробки (з вказаною шириною фрезерування) від врізання 1 ножа до його виходу з різання. Інші умови: глибина різання $t = 2$ мм, подача на зуб фрези $s_z = 0,5$ мм, частота обертання фрези $n = 600$ хв⁻¹. Крок інтегрування – 0,0001 с ($0,36^\circ$). При відпрацюванні моделі розглянуті варіанти зі зміною дисипативного коефіцієнта від 10^3 до $5 \cdot 10^4$ Нс/м, деформативного від $5 \cdot 10^6$ до 10^8 Н/м.

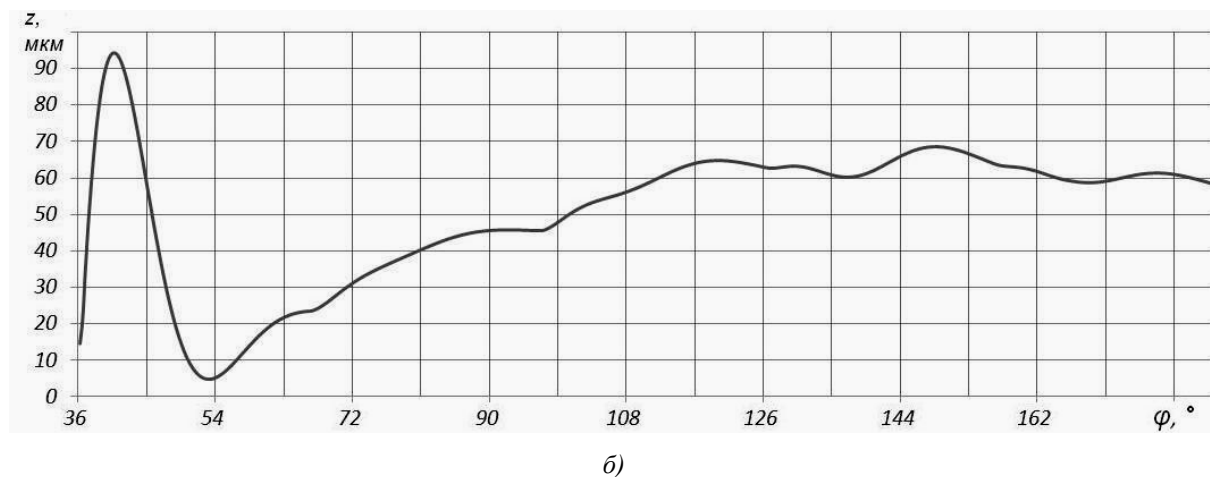
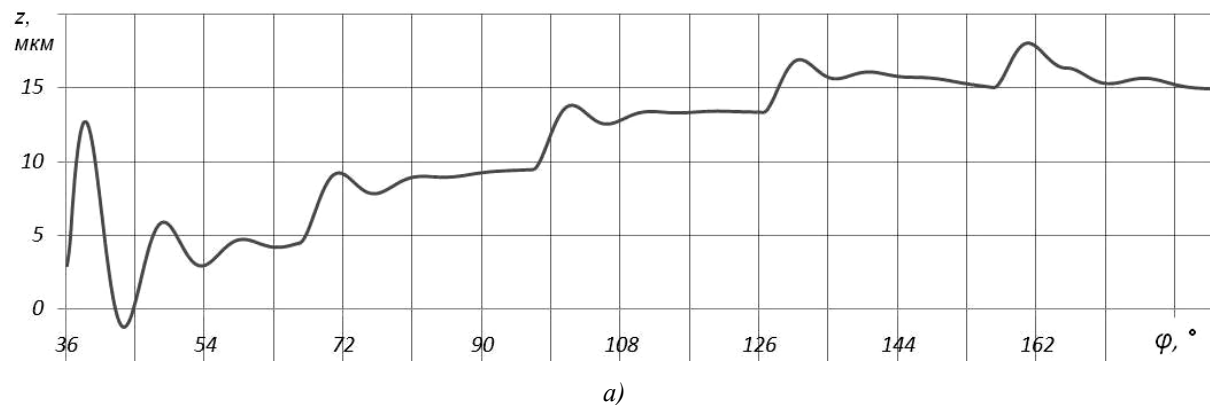


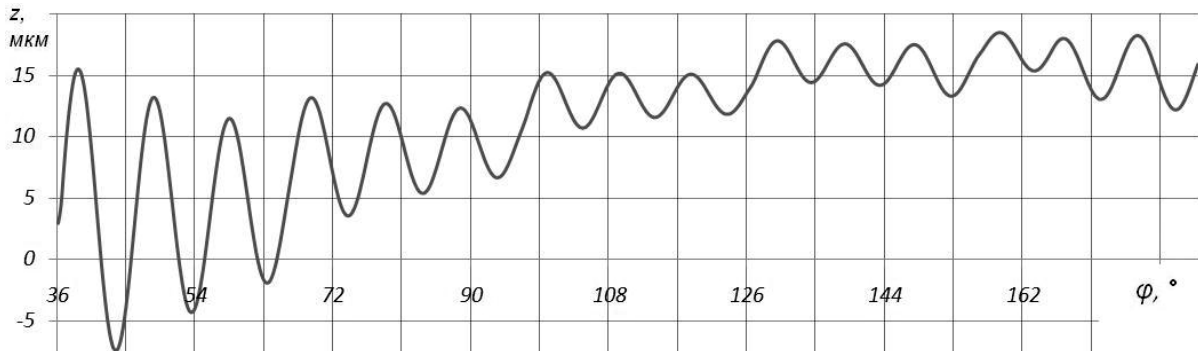
Рис. 2. Діаграми коливань фрези по осі z (рис. 1) при торцевому фрезеруванні при зміні значень деформативного коефіцієнта рівнянь (1). Дисипативний коефіцієнт $b = 10^4$ Нс/м: а) $C = 5 \cdot 10^7$; б) $C = 10^7$ Н/м

Висновки:

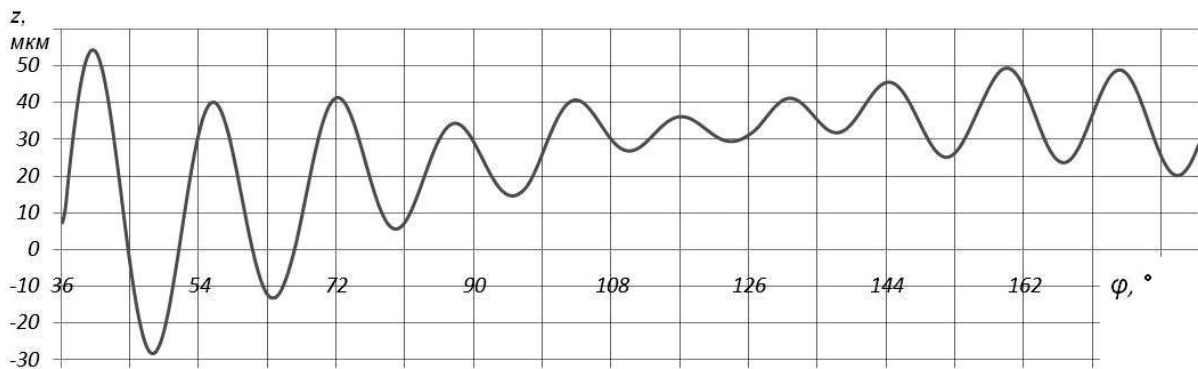
1. Майже пропорційно збільшенню деформативного коефіцієнта рівнянь (1) зменшується величина загального зміщення фрези (відтиснення від заготовки) та амплітуда початкових коливань при врізанні першого ножа фрези. Це пояснюється лінійністю диференціальних рівнянь моделі.

2. При зменшенні дисипативного коефіцієнта від $b = 10^4$ Нс/м до $b = 2 \cdot 10^3$ Нс/м у системі виникає коливальний процес, амплітуда і частота якого залежить від значення деформативного коефіцієнта (при незмінності інерційного коефіцієнта).

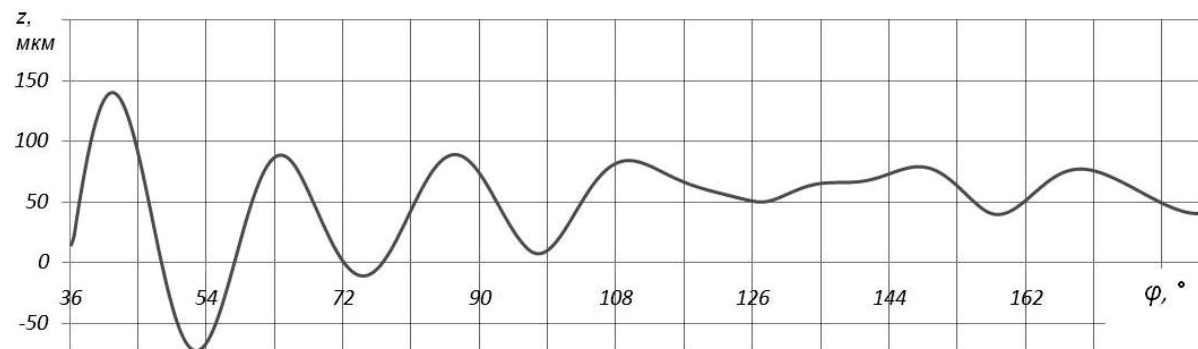
3. Але при певному співвідношенні коефіцієнтів рівнянь (1) стабільний коливальний процес (автоколивання) не виникає навіть при меншому значенні деформативного коефіцієнта (рис. 2, б та 3, в). Це можна пояснити неспівпадінням частоти збуджуючої сили при врізанні наступного ножа з першою частотою власних поперечних коливань фрези і, відповідно, відсутністю постійного живлення автоколивального процесу.



а)



б)



в)

Рис. 3. Діаграми коливань фрези по осі z (рис. 1) при торцевому фрезеруванні при зміні значень деформативного коефіцієнта рівнянь (1).

Дисипативний коефіцієнт $b = 2 \cdot 10^3$ Нс/м: а) $C = 5 \cdot 10^7$; б) $C = 2 \cdot 10^7$ Н/м; в) $C = 10^7$ Н/м

4. На відміну від [3], за представленою моделлю торцевого фрезерування, в широкому діапазоні зміни деформативного та інерційного коефіцієнтів, не простежується швидке зростання амплітуди коливань: стабільний коливальний процес (автоколивання) виникає після входу в різання першого леза фрези і підтримується врізанням наступних лез (рис. 3, а, б), або присутній періодичний, швидко згасаючий сплеск вимушених коливань (рис. 2, а). Наявні автоколивання мають вигляд биття з плавною зміною амплітуди і незначною зміною періоду коливань (що повністю узгоджується з експериментальними даними [3]).

5. Максимальне амплітудне відхилення фрези у всіх розглянутих випадках моделювання відповідає врізанню першого ножа. При збільшенні кількості різальних лез, що приймають участь у різанні,

простежується стабілізація коливального процесу (за його наявності) з повільним зростанням величини відтиснення фрези від поверхні різання.

У подальших дослідженнях необхідно удосконалити розроблену математичну модель для:

- врахування осьових коливань торцевої фрези, які при чистовому фрезеруванні визначають кінцеву шорсткість обробленої поверхні;
- визначення впливу на динамічну стабільність процесу торцевого фрезерування використання різальних елементів з різною жорсткістю та пружно-демпфуючими властивостями;
- забезпечення можливості дослідження нових конструкцій торцевих фрез з ступінчастими схемами різання, з нерівномірним кроком розміщення різальних елементів, комбінованої обробки.

Список використаної літератури:

1. *Мельничук П.П.* Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : автореф. ... докт. техн. наук / *Петро Петрович Мельничук*. – К. : НТУУ “КПІ”, 2002. – 26 с.
2. *Струтинский В.Б.* Математичне моделювання металорізальних верстатів : монографія / *В.Б. Струтинський, П.П. Мельничук*. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 570 с.
3. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / *И.Г. Жарков*. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
4. *Орликов М.Л.* Динамика станков / *М.Л. Орликов*. – К. : Вища школа, 1989. – 272 с.
5. *Кудинов В.А.* Динамика станков / *В.А. Кудинов*. – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
6. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие / *В.Н. Подураев*. – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
7. *Дроздов Н.А.* К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / *Н.А. Дроздов* // Станки и инструмент. – 1937. – № 22. – С. 21–25.
8. *Мельничук П.П.* Динаміка процесу торцевого фрезерування при зношуванні різальних елементів / *П.П. Мельничук, Я.А. Степчин* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. – № 2 (61). – С. 33–40.
9. *Виговський Г.М.* Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. ... канд. техн. наук / *Георгій Миколайович Виговський*. – К. : НТУУ “КПІ”, 2000. – 16 с.
10. *Свинин В.М.* Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания : автореф. ... докт. техн. наук / *В.М. Свинин*. – Иркутск : ИГТУ, 2008. – 26 с.

СТЕПЧИН Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

E-mail: stepchiny@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 22.03.2013

Степчин Я.А. Математична модель поперечних коливань торцевої фрези при чистовому фрезеруванні
Степчин Я.А. Математическая модель поперечных колебаний торцевой фрезы при чистовом фрезеровании
Stepchin Ya.A. **Mathematical model of transverse vibrations of a face mill for finish milling**

УДК 621.94

Математическая модель поперечных колебаний торцевой фрезы при чистовом фрезеровании / Я.А. Степчин

В статье представлена математическая модель колебаний торцевой фрезы при чистовом фрезеровании и результаты ее исследования

УДК 621.94

Mathematical model of transverse vibrations of a face mill for finish milling / Ya.A. Stepchin

In article presents the mathematical model of vibrations face mill for finish milling, and the results of its research