

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ
РІЗНИХ СХЕМ РІЗАННЯ**

Розглянуто умови протидії виникненню автоколивань при торцевому фрезеруванні. Представлено структурні схеми математичних моделей технологічної обробної системи (ТОС) торцевого фрезерування різної деталізації. Запропоновано рекомендації щодо застосування фрез різних конструкцій для протидії виникненню регенеративних автоколивань.

Ключові слова: торцеве фрезерування, схема різання, технологічна обробна система, ТОС, автоколювання.

Постановка проблеми. Основним напрямком розвитку сучасного машинобудівного виробництва є інтенсифікація технологічних процесів з метою підвищення їх продуктивності. Серед операцій механічної обробки одне з перших місць за застосування та обсягу зрізаного з заготовок матеріалу займає фрезерування, в першу чергу, торцеве і кінцеве. Використання інтенсивних режимів різання при чорновому і напівчистовому фрезеруванні стримується, головним чином, втратою динамічної стабільності технологічної обробної системи. Виникаючі автоколювання неприпустимо великої амплітуди, крім обмеження продуктивності, різко знижують стійкість інструмента, термін служби обладнання, точність і якість оброблених поверхонь.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ТОС, що є складною взаємопов'язаною системою, що складається з пружної системи верстата, робочих процесів тертя, різання, а також процесів, що відбуваються в двигунах, можуть виникати неконтрольовані колювання. В цілому вони поділяються на вимушені, параметричні, релаксаційні та самозбуджувані, або автоколювання [1, 2].

Причини виникнення вимушених колювань у ТОС взагалі достатньо вивчені [1–3]. Вони виникають при наявності в системі зовнішньої періодичної сили, яка викликає колювальний процес з частотою, яка дорівнює частоті збуджуючої сили. Причиною появи збуджуючої сили може бути процес різання (його переривчастість, нерівномірність припуску), а також сили, що виникають в ТОС за межами зони різання. Зазвичай для усунення (або значного зменшення їх величини) вимушених колювань достатньо ліквідувати причини їх виникнення.

Параметричні колювання виникають при наявності будь-якого змінного параметра, який створює вплив, близький до дії змінної сили (змінна жорсткість валів, підшипників, інструмента). Параметричні колювання за своїм характером близькі до вимушених і часто не виокремлюються [1, 3].

Релаксаційні колювання виникають при повільних переміщеннях вузлів верстатної системи, коли періодично відбувається перехід від тертя спокою до тертя руху вузла верстата зі створенням послідовності стрибкоподібних переміщень. Релаксаційні колювання викликають нестійке переміщення вузлів і, відповідно, значні динамічні навантаження на вузли верстата та різальний інструмент, погіршують якість обробки. Основні методи протидії даному виду колювань також в цілому визначені – зменшення опору у парах тертя, визначення оптимальних значень швидкостей переміщення вузлів.

Суттєво складнішим і небезпечним видом вібрацій у ТОС є автоколювання, перш за все, за неоднозначністю визначення причини їх виникнення та можливостей її усунення. Постійно виникаючі під час різання власні згасаючі колювання ТОС, за певних умов, можуть переходити в незгасаючі автоколювання. Енергію для їх підтримки створює змінна сила різання [1, 3].

Причинами виникнення і підтримки автоколювань елементів ТОС вважаються декілька фізичних явищ, які можуть діяти одночасно, або окремі з них мати переважаючий вплив. Це залежить від умов обробки різанням та стану пружної системи верстата, перш за все, жорсткості та демпфуючої здатності її елементів, параметрів міцності та пластичності оброблюваного матеріалу, режиму різання.

Автоколювання, супутні процесу різання металів, прийнято умовно розділяти на первинні, які виникають при першому проході інструмента, і вторинні, що викликаються хвилеподібним слідом на поверхні різання при наступних проходах [1, 3].

Вторинне збудження автоколювань, причини і механізм його виникнення вивчені значно менше, ніж первинне, хоча за певних умов інтенсивність збурення автоколювань за рахунок регенерації багатократно перевищує інтенсивність первинного збурення.

У [3] визначено такі особливості регенеративних автоколювань:

1. Обробка слідами вібрацій знижує граничне значення ширини зрізаного шару (граничну стружку) не менше ніж у два рази. Верхня межа цього зменшення не обмежена.

2. Динамічна система, будучи стійкою за відсутності запізнювання (обробці "по чистому"), залежно від величини запізнювання може ставати нестійкою або залишатися стійкою. Зі збільшенням часу запізнення зони стійкої та нестійкої роботи верстата чергуються.

3. Нестійка динамічна система при різанні "по чистому" за рахунок впливу слідів може отримати стійкість.

Ці результати дають оцінку впливу механізму регенерації коливань на зниження границі стійкості ТОС та важливі для з'ясування фізичної причини механізму регенерації коливальних процесів. За певних умов цей механізм може створювати стабілізуючий ефект. Відповідно, існує можливість впливати на процес регенерації з метою управління рівнем вторинних автоколивань.

За даними [4], при великих швидкостях різання регенеративний ефект поступово послаблюється, що позитивно позначається на стабільності ТОС. Проте такі умови обробки з'являються тільки при швидкісному та надшвидкісному різанні. Також показано, що частота автоколивань змінюється не плавно, а стрибкоподібно при частотах обертання шпинделя, які забезпечують найбільшу стабільність обробки і відповідають приблизно фазовому зсуву $\nu = 1,0$.

Дослідження з оцінки внеску різних механізмів первинного та вторинного збудження автоколивань при точінні виконано також у роботах [5, 6]. Встановлено, що інтенсивність збурення за рахунок регенерації багатократно (у 5...100 разів) перевищує інтенсивність первинного збурення автоколивань. За даними автора, відставання сили від товщини зрізу T_k впливає на стійкість ТОС залежно від його співвідношення з частотою p регенеративних автоколивань. Для системи з одним ступенем свободи при $pT_k < 1$ відбувається зменшення її стійкості (до 30 % якщо $pT_k \sim 0,5$), а при $pT_k > 2$ – збільшення стійкості. Проміжне значення параметра відставання ($1 < pT_k < 2$) несуттєво впливає на стійкість ТОС.

Таким чином, існують певні умови забезпечення безвібраційної обробки (відсутності або значного послаблення вторинних автоколивань), які визначаються характеристиками ТОС, параметрами режиму різання та особливостями процесу регенерації автоколивань.

Мета дослідження: розробити математичні моделі динаміки процесу торцевого фрезерування різних схем різання та виконати їх аналіз з метою визначення умов виникнення автоколивального процесу при обробці "по сліду" та підвищення вібростійкості процесу торцевого фрезерування.

Викладення основного матеріалу. Особлива складність моделювання динаміки обробки торцевим фрезеруванням (на відміну, наприклад, від точіння одним різцем) полягає в тому, що:

- постійно змінюється кількість різальних елементів, які приймають участь у різанні;
- з входом (виходом) різального елемента у різання дискретно змінюються параметри обробної системи та процесу обробки: жорсткість підсистеми інструмента, напрямок і величина рівнодійної сили різання;
- напрямок рівнодійної сили різання змінюється також (постійно і монотонно) залежно від поточного кута повороту фрези під час обробки.

Крім того, явище виникнення та підтримки автоколивального процесу під час різання може бути пояснено тільки нелінійністю процесів живлення коливальної системи енергією та її розсіювання [1].

Автоколивальний процес при обробці "по сліду" (регенеративні автоколивання) також характеризуються явищем підстроювання параметрів коливань під період хвилі сліду на обробленій поверхні від проходу попереднього різального елемента [4–7]. Відповідно, автоколивання відбуваються практично завжди на частотах близьких до власної частоти домінуючої системи, але з постійним трендом відносно цієї частоти – "биттям".

Визначимо фактори, що забезпечують підтримку виникаючого автоколивального процесу при торцевому фрезеруванні і основні шляхи їх усунення (послаблення):

1. Періодичність вступу в різання різальних елементів обумовлена незмінною кутовою швидкістю фрези та постійним кутовим кроком розміщення різальних елементів (ножів) стандартних фрез. Явище підстройки коливальної системи під період хвилі на поверхні різання від попереднього проходу призводить до значного підсилення автоколивань (при інтенсивних режимах обробки) зі збільшенням їх амплітуди і втратою стійкості обробної системи.

Методами протидії є використання конструкцій фрез з різним кутовим кроком розміщення різальних елементів або модуляція (періодична, під час кожного оберту фрези зміна) швидкості різання. Перший варіант є конструктивно більш простим і економічно доцільнішим, але має певні обмеження у ефективності застосування.

2. Використання пристроїв для гасіння вібрацій, що вводяться у конструкцію фрези, або розміщуються на інших складових ТОС, мають обмежену ефективність, тому що не впливають на причину виникнення автоколивального процесу, а тільки збільшують розсіювання енергії коливань.

3. Використання фрез "нестандартних" схем різання – з розділенням припуску по глибині, суміщенням чорнової та чистової обробок, впливає тільки на зменшення нерівномірності процесу фрезерування.

Узагальнені спрощені математичні моделі динаміки ТОС торцевого фрезерування з врахуванням впливу сліду від проходу попереднього різального елемента на різання наступним різальним елементом у вигляді блок-схеми представлені на рисунку 2.

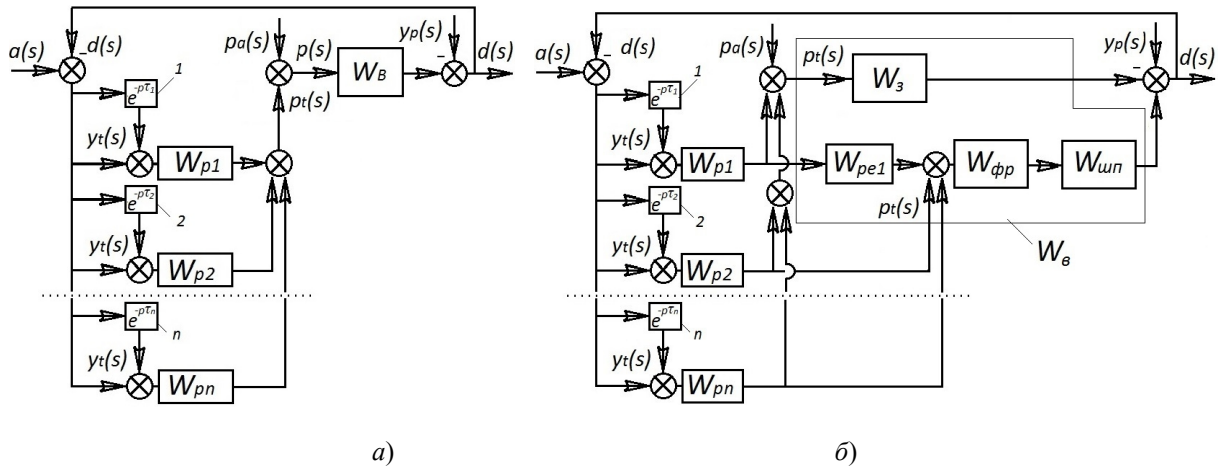


Рис. 2. Загальна структурна схема математичної моделі ТОС торцевого фрезерування: а) містить еквівалентну пружну систему верстата (W_B) і процесу різання (W_{p1}) окремими різальними елементами; б) враховує незалежне коливання одного з групи (чорнового) різального елемента відносно фрези

Позначення на схемах (рис. 2) наведені, в основному, за [8] у зображеннях за Лапласом:

$a(s)$ – зміна розмірів деталі;

$y_t(s)$ – зміна припуску залежної від часу (по перпендикуляру до обробленої поверхні);

$p_t(s)$ – динамічна складова сили різання, обумовлена зміною розмірів деталі;

$p_a(s)$ – випадкова зміна сили різання;

$y_e(s)$ – відносні переміщення деталі і шпинделя з фрезою в зоні різання;

$y_p(s)$ – випадкова зміна взаємного положення фрези і деталі;

$p(s)$ – результуюча сила різання;

$d(s)$ – похибка обробки;

1, 2, ..., n – елементи запізнення, що враховують вплив сліду від проходу попереднього різального елемента на зміну припуску;

τ_i – запізнення, яке відповідає часу між проходами попереднього і наступного різальних елементів;

W_{pe1} , W_{ϕ} , $W_{шп}$, W_3 – трансформуючі функції, відповідно, чорнового різального елемента, фрези, шпинделя верстата та підсистеми заготовки.

У загальному випадку параметри елементів запізнення і їх вплив на стійкість процесу фрезерування різний. При обробці стандартною фрезою з однаковим кутовим кроком розташування різальних елементів, незміною частотою обертання шпинделя $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n$. Також умовно однаковим (якщо не враховувати похибку осьового та радіального встановлення різальних елементів) є можливість вважати величину статичного силового впливу на окреме лезо фрези. Але і у цьому найпростішому випадку теоретичний аналіз системи ускладнюється: передавальна функція ланки запізнення не є дрібно-раціональною. Для спрощення вирішення цього завдання традиційно ланка запізнення замінюється однією-двома апериодичними ланками. Така заміна дозволяє отримувати якісно близькі результати, але в деяких випадках (наприклад, при відносно великих величинах запізнення) є неточною [9].

Введення змінного кутового кроку розташування різальних елементів $\tau_1 \neq \tau_2 \neq \dots \neq \tau_n$ теоретично унеможливає підстроювання коливальної системи під період хвилі на поверхні різання від попереднього проходу. Проте це рішення є ефективним тільки при низьких власних частотах коливальності домінуючої системи та відносно високій кутовій швидкості фрези (для кінцевого фрезерування), коли процес встановлення автоколивальності більший, ніж час проходу двох сусідніх різальних елементів.

Зниження силової напруженості обробки за рахунок ступінчастого фрезерування обмежується допустимою кількістю і досяжною точністю встановлення різальних елементів. Суміщення чорнкової і чистової обробки з забезпеченням високої продуктивності ускладнюється – автоколивання домінуючої системи від різання групи чорнових різальних елементів впливають на кінцеву якість чистової обробки.

Одночасна чорнова та чистова обробка торцевою фрезою загалом може виконуватися з підтримкою інтенсивного режиму різання при ізоляції негативного впливу коливального процесу, який викликають

чорнові різальні елементи, від чистових різальних елементів. У цьому випадку фреза може бути представлена тільки як багатомасова система.

На рисунку 2, б показана структурна схема математичної моделі ТОС торцевого фрезерування групою чистових (напівчистових) різальних елементів з урахуванням незалежного коливання чорнового різального елемента відносно фрези.

Розміщений у окремому, максимально віброізолюваному вузлі (вузлі демпфування) чорновий різальний елемент знімає основну частину припуску з оброблюваної деталі, сприймаючи найбільші ударні та вібраційні навантаження під час врізання і різання. Вузол демпфування виконує функції розсіювання енергії ударів і коливань та віброізоляції фрези від негативних впливів чорнового різання.

Напівчистові та чистові різальні елементи виконують гарантоване знімання усього припуску. Завдяки їх віброізоляції від чорнових різальних елементів, як основного джерела коливань, вони забезпечують обробку з меншими ударами, нерівномірністю та відхиленням від заданих розмірів.

Таким чином, є можливість виконувати одночасну чорнову та чистову обробку однією торцевою фрезою з усуненням основних причин виникнення регенеративних автоколивань:

1. Коливання найбільш навантажених чорнових різальних елементів відбувається на частоті підсистеми заготовки або на власній частоті вузла демпфування ізолювано (частково або повністю) від коливань фрези з напівчистовими та чистовими різальними елементами.

2. Створені на поверхні різання хвилі від проходу чорнових різальних елементів не збігаються за кроком і фазою з коливаннями фрези і зрізаються напівчистовими різальними елементами без збудження регенеративних автоколивань.

3. Кінцеве забезпечення якості обробки виконується чистовими, найменш навантаженими різальними елементами.

Висновки:

1. Визначено основні причини виникнення регенеративних автоколивань у ТОС при торцевому фрезеруванні та шляхи їх усунення.

2. Розроблено структурні схеми математичних моделей ТОС торцевого фрезерування з врахуванням процесу різання окремими різальними елементами та незалежного коливання одного з групи різального елемента відносно фрези.

3. Запропоновано схему комбінованої чорнкової та чистової обробки однією торцевою фрезою з усуненням основних причин виникнення та підтримки регенеративних автоколивань у ТОС.

Список використаної літератури:

1. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие для вузов / *В.Н. Подураев.* – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
2. *Орликов М.Л.* Динамика станков / *М.Л. Орликов.* – К.: Вища школа, 1989. – 272 с.
3. *Кудинов В.А.* Динамика станков / *В.А. Кудинов.* – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
4. *Merritt H.E.* Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / *H.E. Merritt* // ASME J. Eng. Indus. – 1965. – Vol. 87. – Pp. 236–253.
5. *Зарс В.В.* Моделирование автоколебаний металлорежущих станков / *В.В. Зарс* // Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1969. – Вып. 18. – С. 157–173.
6. *Зарс В.В.* Сравнение некоторых условий регенерации следа / *В.В. Зарс* // Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1968. – Вып. 17. – С. 51–64.
7. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / *И.Г. Жарков* – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
8. *Струтинский В.Б.* Математичне моделювання металорізальних верстатів : монографія *В.Б. Струтинский, П.П. Мельничук.* – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 570 с.
9. *Лукас В.А.* Теория автоматического управления / *В.А. Лукас.* – М. : Недра, 1990. – 416 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 24.09.2013