

Д 64.050.12 при Національному
технічному університеті України
«Харківський політехнічний інститут»
Зубковій Н.В.

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н. Ступницького Вадима Володимировича
на дисертаційну роботу Данильченко Марії Андріївни

«Забезпечення динамічної якості

технологічної обробної системи при точінні»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

Актуальність теми.

Вважається, що основною причиною інтенсивних вібрацій і значного зростання шорсткості на поверхні деталі є так звана обробка «за слідом», що викликає виникнення регенеративних коливань, які призводять до утворення на рельєфі обробленої поверхні брижі. Наявність таких автоколивань істотно впливає на ефективність процесу і знижує шорсткість та точність розмірів обробленої деталі. Крім того, вібрації можуть привести до зменшення стійкості та втрати працездатності різального інструменту.

Традиційно гасіння регенеративних коливань проводилося шляхом збільшення демпфування технологічної системи «верстат-пристрій-інструмент-заготовка», або зниженням режимів різання. Але ці способи є екстенсивними і не завжди відзначаються ефективністю. Перший з них вимагав використання спеціальних механізмів і досить трудомісткої процедури їх регулювання, другий - призводив до зниження продуктивності обробки. Нові можливості у вирішенні цього питання з'явилися тільки в сучасних верстатах ЧПК, оснащених приводами з безступінчастим регулюванням частоти обертання шпинделя. Наявність такого регулювання дозволило додати до методів гасіння регенеративних коливань обробку із змінною частотою обертання шпинделя, що програмується опцією «Spindle Speed Variation» (SSV). Але ефективне використання цієї опції потребує знання залежності зміни рівня відносних коливань інструмента і заготовки в робочому діапазоні частот обертання шпинделя від режимів різання. Отримується така залежність методами моделювання та аналізу взаємодії ТОС з процесом різання.

Тому підвищення адекватності опису (на прикладі токарної обробки) взаємодії технологічної системи з процесом різання динамічними моделями, спрямованими на прогнозування і вибір найкращих умов виконання процесу

різання є актуальною науково-практичною задачею. Необхідно зазначити, що саме така вимога висувається і до створення віртуальних двійників процесів обробки при проектуванні систем кібер-фізичного виробництва (CPPS).

Актуальність теми роботи підтверджується так само й тим, що вона пов'язана з виконанням держбюджетної НДР «Інноваційні технології та верстатно-інструментальне оснащення високопродуктивної обробки різанням сучасних конструкційних матеріалів» (державний реєстраційний номер 0117U000492).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Данильченко М.А. є достатньо високою й базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, критичному аналізу отриманих результатів і якісному формулюванні отриманих висновків.

Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату для опису фізичних явищ, які призводять до виникнення регенеративних коливань при токарному обробленні. Отримані результати перевірені шляхом проведення досліджень на трьох різних моделях токарних верстатів і доведення фізичного зв'язку між причинами, що викликають виникнення регенеративних коливань, і наслідками їх дії при формуванні рельєфу обробленої деталі. В сукупності це підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур аналізу динаміки пружної технологічної оброблюваної системи (ТОС) та чисельних методів моделювання, адекватністю аналітичних моделей фізичній суті описуваних процесів. Наукові результати здобувача успішно використані під час апробації на обладнанні представника НААС в Україні – ДП «Абпланалп Україна» (м. Київ)

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- уперше розроблено структурну схему процесу різання з двома входами по ортогональних осях: глибині різання і поздовжньої подачі, і відповідними вихідними показниками - деформаціями за цими напрямками, що формують геометричні параметри зрізаного шару припуску і дозволяють шляхом

моделювання відносного руху різця чисельними методами в часовому і частотному діапазонах отримувати характеристики регенеративних коливань як у вигляді осцилограм, так і амплітудно-фазово частотних (діаграм Найквіста) характеристик для оцінки сталості ТОС.

- уперше теоретично доведено і експериментально підтверджено ефективність застосування розробленої технології прогнозування вібраційної сталості при токарному обробленні, що ґрунтується на застосуванні пружно-деформаційної моделі зміни зрізуваного припуску за глибиною різання і подачею для опису відносного руху різця і використанні експериментально отриманих динамічних характеристик ТОС для формування вхідних даних пружної механічної системи моделі процесу різання.

- одержали подальший розвиток модель формування динамічних характеристик пружної системи ТОС як замкненої динамічної системи з урахуванням контактної взаємодії заготовки з різцем, на підставі чого доведено адекватність математичного опису процесу точіння з представленням пружної ТОС у вигляді одномасової системи із експериментально визначеними значеннями її зведеної маси, жорсткості і демпфування.

- вдосконалено методику використання результатів моделювання процесу точіння для практичної реалізації методу SSV при токарному обробленні шляхом визначення періоду зміни частоти обертання шпинделя моделюванням за критерієм мінімуму часу загасання коливань до встановленої величини амплітуди за всіма трьома осями координат за один оберт заготовки.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Розроблена здобувачем математична модель виникнення регенеративних коливань при токарному обробленні, що ґрунтується на пружно-деформаційній моделі зміни зрізуваного припуску, спричиненої відносними пружними зміщеннями інструмента і заготовки в процесі різання вперше дає можливість комплексного урахування впливу динаміки процесу різання (взаємопов'язаної зміни глибини різання і поздовжньої подачі) на утворення і розвиток регенеративних коливань на фізичному рівні. Це є теоретичною основою створення достатньо простої базової моделі прогнозування вібраційної стійкості ТОС при токарному обробленні і вибору параметрів зміни частоти обертання шпинделя для реалізації SSV-методу гасіння регенеративних коливань.

Згідно сучасної концепції систем кібер-фізичного виробництва, саме такий характер математичної моделі зможе забезпечити коригування процесу обробки як в режимі реального часу, так і на етапах нарощування за допомогою інтелектуальної системи, що використовує стратегії самонавчання.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 16 наукових працях, у тому числі 5 публікаціях у наукових фахових виданнях України. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи:

Дисертаційна робота Данильченко М.А. складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, 3 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відомості про апробацію, публікації, структуру і обсяг дисертації.

В першому розділі виконано аналіз існуючого стану моделювання, прогнозування і гасіння регенеративних коливань при обробленні на металорізальних верстатах.

Насамперед визначено вимоги сучасної концепції розвитку обробної галузі до математичних моделей, що використовуються для задач моделювання і прогнозування якості оброблення і наголошено на необхідності моделювання процесу різання за допомогою комплексної моделі сили, стійкості і чистоти поверхні.

Проведено аналіз досліджень впливу основних факторів (нелінійності характеристик процесів різання і тертя та обробки «за слідом») на виникнення і розвиток регенеративних коливань, математичних моделей, що описують це явище, методів визначення умов стійкості ТОС і практичного гасіння регенеративних коливань.

За результатами аналізу сформульовано головну умову створення адекватної динамічної моделі взаємодії ТОС з процесом різання, а саме необхідність: по-перше – адекватної моделі залежності сили різання від режиму обробки, матеріалу заготовки і інструменту та інших факторів; по-друге – врахування динамічних характеристик пружної ТОС; і по-третє – опис геометричної моделі взаємодії інструменту і заготовки у вигляді аналога швидкості зрізання припуску – Material Removal Rate (MRR).

Відповідно до цього було сформульовано мету роботи і визначено задачі дослідження.

В другому розділі розроблені дві альтернативні динамічні моделі пружної системи ТОС: перша – зосереджена одномасова, що є базовою для моделювання регенеративних коливань і подальшого вибору параметрів режиму зміни частоти обертання шпинделя (SSV) для їх гасіння; друга –

розподілена багатотільна для дослідження закономірностей формування і особливостей зміни динамічних характеристик ТОС в процесі токарного оброблення.

Структурна схема процесу точіння за першою моделлю описує замкнену динамічну одномасову систему з двома входами - за глибиною h та подачею f , відповідно, двома виходами - деформаціями δh та δf за цими напрямками. Передавальними функціями запізнювання $e^{-s\tau}$ (де τ - час одного оберту шпинделя, s - оператор Лапласа) враховується обробка за слідом за напрямком обидвох координат. Таке представлення процесу точіння дозволяє описувати зміну зрізуваного припуску на фізичному рівні, тобто з урахуванням безпосереднього зв'язку режимів оброблення з пружними деформаціями (коливаннями) формоутворюючих елементів ТОС.

спричиненої відносними пружними зміщеннями інструмента і заготовки в процесі різання вперше дає можливість комплексного урахування впливу динаміки процесу різання (взаємопов'язаної зміни глибини різання і поздовжньої подачі) на утворення і розвиток регенеративних коливань на фізичному рівні.

Розподілена багатотільна модель призначена для моделювання динамічних характеристик пружної ТОС, зокрема і її стійкості з урахуванням контактної взаємодії інструмента із заготовкою і використана для підтвердження адекватності першої моделі для розв'язку задач моделювання регенеративних коливань і подальшого вибору параметрів режиму зміни частоти обертання шпинделя (SSV) для їх гасіння, але має значні перспективи у застосуванні при проектуванні вузлів ТОС, що визначають її динамічний стан.

Третій розділ присвячено експериментальному підтвердженню адекватності розроблених динамічних моделей регенеративних коливань та прогнозування стійкості ТОС при токарному обробленні.

Перевірка адекватності розробленої в 2-му розділі одномасової моделі процесу точіння виконувалась порівнянням обчислених частотних характеристик ТОС токарно-гвинторізного верстата мод. 1К62 з результатами частотного аналізу профілограм реально обробленої на ньому поверхні деталі. Вхідні параметри цієї моделі (жорсткість ТОС, частота власних коливань і коефіцієнт загасання коливань) визначались експериментально.

Порівняння змодельованих частотних характеристик процесу різання з результатами частотного аналізу профілограм реально обробленої на токарному верстаті поверхні деталі, підтвердило справедливність припущення щодо безпосереднього впливу осьових коливань на площу зрізу і формування профілю торцевої поверхні, та більшу точність опису фізики процесу виникнення регенеративних коливань розробленою моделлю, що враховує зміну зрізуваного

припуску, порівняно з класичною моделлю незалежних коливань за напрямками подачі і глибини різання.

Результати експериментального визначення частотних характеристик ТОС токарно-гвинторізного верстата мод. 16Б05П при імпульсному збуренні підтиснутої різцем консольно-закріпленої заготовки дозволили встановити закономірності формування і особливості зміни динамічних характеристик ТОС в процесі токарного оброблення та підтвердити адекватність математичного опису процесу виникнення регенеративних коливань з представленням пружної ТОС у вигляді одномасової системи із експериментально визначеними значеннями її зведеної маси, жорсткості і демпфування.

В четвертому розділі розроблена математична модель та прикладна програма для моделювання виникнення регенеративних коливань при точінні у 3D просторі. Програма призначена для цілеспрямованого пошуку найкращих параметрів гармонічного закону зміни частоти обертання шпинделя (опція SSV) при програмуванні на токарному верстаті з числовим програмним управлінням.

З допомогою цієї програми було обрано раціональні параметри опції SSV і проведено обробку заготовки без і з використанням цієї опції. Використання опції дозволило зменшити шорсткість обробленої поверхні з Ra 6,3 до Ra 2,5.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 120 найменувань.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. В розділі 2.2. автором отримано дві передавальні функції $W(s)$: одна пов'язує глибину різання h (вхід) і деформацію δh (вихід), інша – подачу f (вхід) і деформацію δf (вихід). Обидві функції використовуються в алгоритмі моделювання процесу регенеративних коливань. В зв'язку з цим бажано було б конкретизувати як пов'язані вищезазначені передавальні функції між собою і із змінними стану.

2. Кількісна обмеженість масиву експериментальних даних, використаних в розділі 3.1.1 для визначення жорсткостей ТОС, потребує пояснення застосованої методики проведення вимірювань.

3. Не зрозуміло, чим пояснюється наявність т. зв. «ненульових» амплітуд в спектрах коливань при імпульсному збуренні ТОС (рис. 3.15 – 3.19) при «нульовій» частоті збурення? Це ж стосується і спектрів коливань поданих на рис.

3.32 і 3.33.

4 Оскільки дослідження динамічних характеристик ТОС проводилось на 3-х токарних верстатах різних моделей, то треба було навести й результати токарного оброблення на всіх цих верстатах, а не лише на 2-х.

5. В розділі 4.3.1, присвяченому попередньому вибору параметрів зміни частоти обертання шпинделя (опція «Spindle Speed Variation»), недостатньо чітко обґрунтовано вибір режиму 15% зміни амплітуди швидкості обертання шпинделя, оскільки на контурній діаграмі часу згасання коливань (рис. 4.3) візуально є й більш широкі зони мінімального часу згасання коливань.

6. Бажано дотримуватись однакової термінології, наприклад, в тексті для тої самої властивості процесу різання вживається як термін «стійкість», так і термін «сталість».

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Данильченко Марії Андріївни «Забезпечення динамічної якості технологічної обробної системи при точінні» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.02.08 – технологія машинобудування. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу підвищення якості токарного оброблення шляхом удосконалення методики прогнозування і гасіння регенеративних коливань. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 11,12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567, а здобувач Данильченко Марія Андріївна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук (PhD) за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Офіційний опонент
завідувач кафедри робототехніки
та інтегрованих технологій
машинобудування Національного
університету «Львівська політехніка»
доктор технічних наук, доцент



Ступницький В.В.

29.04.2021

Підпис д.т.н., доц. Ступницького В. В.
засвідчую:
Вчений секретар НУ «Львівська політехніка»



Брилинський Р.Б.