

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЧАТЕРА ПРИ ТОЧІННІ НА ОСНОВІ РЕКУРЕНТНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто теоретичні закономірності виникнення регенеративного чаттера під час токарної обробки. Проведено аналіз рекурентного співвідношення, що описує зміну товщини зрізаного шару з урахуванням поточних та попередніх пружних зміщень технологічної системи. Показано, що регенеративний механізм формування автоколивальних коливань визначається взаємодією зміщень на поточному та попередньому кроках моделювання. Встановлено умови мінімізації та максимізації варіації товщини зрізаного шару залежно від знаків пружних зміщень. Теоретично обґрунтовано механізм самогасіння коливань або їх переходу в автоколивальний режим. Отримані результати можуть бути використані для подальшого моделювання динамічної стійкості процесу точіння та прогнозування виникнення чаттера.

Ключові слова: чаттер; регенеративний ефект; автоколивання; процес точіння; рекурентне співвідношення; товщина зрізаного шару; динамічна стійкість; коливання технологічної системи.

Abstract

This paper examines the theoretical principles underlying the occurrence of regenerative chatter during turning operations. An analysis is carried out of the recursive relation describing the change in the thickness of the cut layer, taking into account the current and previous elastic displacements of the machining system. It is shown that the regenerative mechanism of self-oscillation formation is determined by the interaction of displacements at the current and previous simulation steps. Conditions for minimising and maximising the variation in the thickness of the cut layer depending on the signs of elastic displacements have been established. The mechanism of self-damping of oscillations or their transition to an auto-oscillatory mode has been theoretically substantiated. The results obtained can be used for further modelling of the dynamic stability of the turning process and for predicting the occurrence of chatter

Keywords: chatter; regenerative effect; self-oscillation; turning process; recursive relationship; thickness of the cut layer; dynamic stability; oscillations of the machining system.

Вступ

У сучасному машинобудуванні одним із важливих завдань є забезпечення стабільності процесу різання та підвищення якості обробки деталей. Під час токарної обробки можуть виникати автоколивання інструмента і заготовки, відомі як чаттер (англ. chatter), що призводять до погіршення точності обробки, зниження якості поверхні та прискореного зношування інструмента.

Одним із основних механізмів виникнення таких коливань є регенеративний ефект, за якого хвилястість поверхні, сформована під час попереднього проходу інструмента, впливає на поточний процес різання. Унаслідок цього товщина зрізаного шару залежить не лише від поточного стану системи, а й від її попереднього стану. Такий механізм створює позитивний зворотний зв'язок, здатний викликати розвиток автоколивального процесу.

Застосування математичних моделей та рекурентних співвідношень дозволяє досліджувати закономірності виникнення регенеративного чаттеру та оцінювати умови переходу технологічної системи у нестійкий режим роботи.

Наукова новизна роботи полягає у теоретичному аналізі рекурентного співвідношення товщини зрізаного шару для пояснення закономірностей виникнення регенеративного чаттера. Встановлено, що характер розвитку або затухання коливального процесу визначається співвідношенням знаків поточного та попереднього пружних зміщень технологічної системи. Теоретично обґрунтовано умови мінімізації та максимізації варіації товщини зрізаного шару.

Метою дослідження є теоретичний аналіз умов виникнення регенеративного чаттера при токарній обробці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати рекурентне співвідношення товщини зрізаного шару;
2. Дослідити вплив поточного та попереднього пружних зміщень на процес формування стружки;
3. Визначити умови виникнення або згасання автоколивань;
4. Встановити закономірності впливу регенеративного ефекту на стійкість процесу точіння.

Результати дослідження

Для опису регенеративного механізму виникнення автоколивань у процесі точіння використано математичну модель, запропоновану Ю. В. Петраковим та співавторами. Особливістю моделі є врахування впливу попередніх проходів різального інструмента на поточний процес формування стружки.

Для врахування регенеративного ефекту використовується рекурентне співвідношення:

$$(h_a)_i = (h_c + \delta_y)_i + (\delta_y)_{\{i-1\}}$$

де $(h_a)_i$ – поточна товщина зрізаного шару на i -му кроці моделювання;

h_c – номінальна товщина зрізу;

δ_y – пружне зміщення системи в напрямку дії сили різання;

$(\delta_y)_{\{i-1\}}$ – зміщення системи на попередньому кроці моделювання.

Із наведеного співвідношення видно, що поточна товщина зрізаного шару визначається не лише поточним станом системи, а й результатами попереднього проходу інструмента.

За відсутності коливань: $\delta_y = 0$. Тому, рівняння набуває вигляду: $(h_a)_i = h_c$. Отже, фактична товщина зрізаного шару залишається сталою та дорівнює номінальному значенню.

У реальних умовах обробки технологічна система зазнає динамічних збурень, унаслідок чого виникають пружні зміщення. Для аналізу зміни товщини зрізаного шару введемо величину її варіації:

$$\Delta h_i = (h_a)_i - h_c = (\delta_y)_i + (\delta_y)_{\{i-1\}}$$

Отриманий вираз показує, що варіація товщини зрізаного шару визначається сумою поточного та попереднього пружних зміщень.

Мінімізація варіації товщини зрізу. Якщо пружне зміщення на поточному кроці $(\delta_y)_i$ та зміщення на попередньому кроці $(\delta_y)_{\{i-1\}}$ мають протилежні знаки, їхня сума прямує до нуля. За такої умови варіація товщини зрізаного шару $\Delta h_i \approx 0$, фактична товщина залишається стабільною і близькою до номінального значення h_c . Згасання коливань зображено на рис. 1

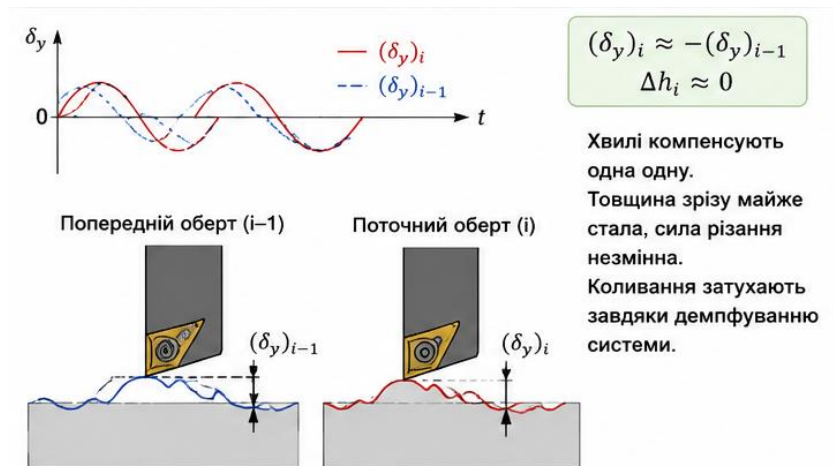


Рис. 1. Згасання коливань (зміщення протилежних знаків)

Геометрично це відповідає ситуації, коли інструмент зрізає майже однаковий шар матеріалу на кожному оберті. Сила різання залишається майже сталою, енергетичне підживлення коливальних коливань відсутнє, а система переходить у стійкий режим.

Якщо поточне та попереднє зміщення мають однакові знаки, їхня сума збільшується, що призводить до зростання варіації товщини зрізуваного шару.

Збільшення товщини стружки викликає відповідне збільшення сили різання. Через наявність позитивного зворотного зв'язку коливання починають підсилюватися. Якщо рівень енергетичного підживлення перевищує можливості внутрішнього демпфування технологічної системи, стаціонарний режим втрачає стійкість і виникає автоколивальний процес - регенеративний чаттер. Розвиток чаттера зображено на рис.2

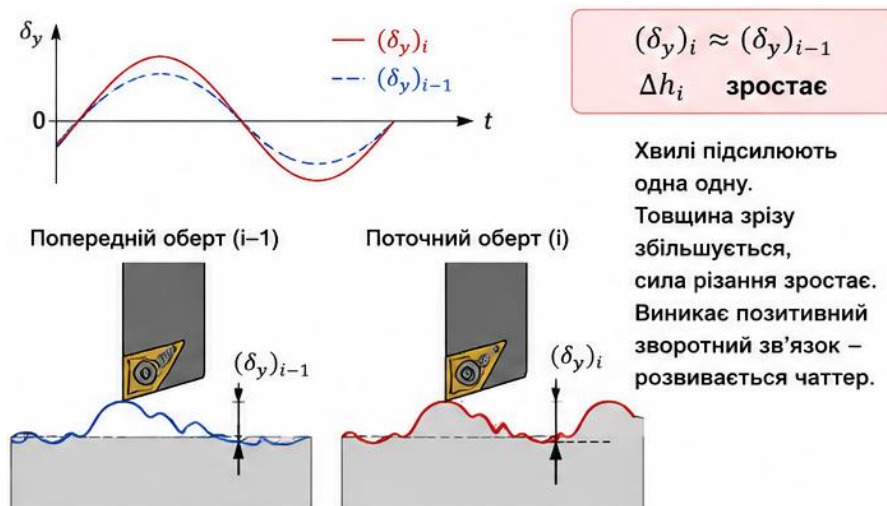


Рис.2. Розвиток чаттеру (зміщення однакових знаків)

Таким чином, розвиток або затухання коливальних коливань визначається характером взаємодії поточного та попереднього пружних зміщень у рекурентному співвідношенні товщини зрізуваного шару.

$$(\delta_y)_i + (\delta_y)_{\{i-1\}}$$

Зростання товщини зрізуваного шару викликає збільшення сили різання, що додатково підсилює коливання. Таким чином формується позитивний зворотний зв'язок, який призводить до виникнення автоколивального процесу - регенеративного чаттера.

Висновки

У роботі проведено теоретичне дослідження закономірностей виникнення регенеративного чаттеру при токарній обробці на основі рекурентного співвідношення товщини зрізуваного шару.

Встановлено, що: поточна товщина зрізуваного шару залежить як від поточного, так і від попереднього стану технологічної системи; варіація товщини зрізу визначається сумою поточного та попереднього пружних зміщень; при протилежних знаках зміщень відбувається мінімізація варіації товщини та затухання коливальних коливань; при однакових знаках зміщень виникає позитивний зворотний зв'язок, що сприяє розвитку автоколивального процесу.

Отримані результати підтверджують важливу роль регенеративного механізму у формуванні чаттера та можуть бути використані для подальшого моделювання динамічної стійкості процесів механічної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Петраков Ю. В. Simulation of Chatter Suppression for Lathe Machining / Ю. В. Петраков // Journal of Mechanical Engineering NTUU «KPI». – 2016. – DOI: 10.20535/2305-9001.2016.77.78960.
2. Тришин П. Р. Дослідження автоколивальної системи процесу різання при точінні / П. Р. Тришин, Ю. М. Внуков, О. Б. Козлова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2025. – № 1(11). – С. 66–74. – DOI: 10.20998/2079-004X.2025.1(11).08.

3. Тришин П. Р. Дослідження впливу оброблюваного матеріалу на інтенсивність регенеративних автоколивань при точінні / П. Р. Тришин, О. Б. Козлова, Н. Гончар, І. Гембель // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2025. – DOI: 10.15588/1607-6885-2025-2-3.

4. Тришин П. Р. Дослідження власних коливань різця-осцилятора при точінні / П. Р. Тришин, О. Б. Козлова, А. Казурова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2025. – DOI: 10.15588/1607-6885-2025-2-9.

5. Тришин П. Р. Вплив стружкоутворення, що створює стружку надлому, на збудження регенеративних автоколивань при точінні / П. Р. Тришин, О. Б. Козлова, Ю. М. Внуков, А. Левченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2026. – DOI: 10.15588/1607-6885-2026-2-6.

Маціпура Олександр Ігорович – студент факультету машинобудування та транспорту Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: oleksandrmatsipura447@gmail.com

Бондаренко Злата Василівна — канд. педагогічних наук, доцент, кафедра вищої математики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Науковий керівник: **Бондаренко Злата Василівна** — канд. педагогічних наук, доцент, кафедра вищої математики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Matsipura Oleksandr I. – a student at the Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia e-mail: oleksandrmatsipura447@gmail.com

Bondarenko Zlata V. — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Supervisor: **Bondarenko Zlata V.** — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia