

П. Р. ТРИШИН, Ю. М. ВНУКОВ, О. Б. КОЗЛОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ

Вібрації під час точіння суттєво впливають на якість обробленої поверхні, знижують точність обробки, прискорюють зношування інструментів та обладнання, а також підвищують витрати на механічну обробку. Крім того, вони створюють несприятливі умови праці для робітників. Різноманітність методів обробки, таких як лезове та абразивне різання, з постійним або змінним перерізом зрізу, а також з переривчастим чи безперервним різанням, ускладнює створення єдиної теорії автоколивань для процесу різання. Це також ускладнює розробку універсальних методів гасіння автоколивань, зокрема при точінні. Однак сучасні дослідження, що використовують інноваційні конструкції коливальних систем на основі різців-осциляторів, дозволяють глибше зрозуміти складну координатно зв'язану природу автоколивань у процесі різання через спрощені моделі таких систем. У дослідженні автоколивної системи при точінні жорсткої деталі вважається, що верстат є абсолютно жорстким. Різець, маючи меншу жорсткість, виступає як осцилятор, що коливається в межах системи. Зона різання, що включає стружкоутворення та тертя, діє як регулятор, створюючи взаємний силовий зв'язок з різцем. Зворотний зв'язок між різцем і зоною різання визначає особливості коливань. У дослідженні розглядаються різні типи коливальних систем із одним і двома ступенями свободи, що дозволяє вивчати регенеративні та «чисті» коливання. Розробка таких систем дозволяє більш детально вивчати механізми збудження автоколивань та їхній вплив на процес точіння.

Ключові слова: автоколивання, різець-осцилятор, коливальна система, точіння

P. R. TRISHIN, Yu. M. VNUKOV, O. B. KOZLOVA INVESTIGATION OF THE SELF-OSCILLATING SYSTEM OF THE CUTTING PROCESS DURING TURNING

Vibrations during turning significantly affect the quality of the machined surface, reduce machining accuracy, accelerate wear of tools and equipment, and increase machining costs. In addition, they create unfavorable working conditions for workers. The variety of machining methods, such as blade and abrasive cutting, with a constant or variable cutting cross-section, as well as with intermittent or continuous cutting, makes it difficult to create a single theory of self-oscillations for the cutting process. This also makes it difficult to develop universal methods for damping self-oscillations, in particular in turning. However, modern research using innovative designs of oscillatory cutting systems allows us to better understand the complex coordinate-related nature of self-oscillations in the cutting process through simplified models of such systems. In the study of a self-oscillating system during turning of a rigid part, it is assumed that the machine tool is absolutely rigid. The cutter, having lower rigidity, acts as an oscillator that oscillates within the system. The cutting zone, which includes chip formation and friction, acts as a regulator, creating a mutual force connection with the cutter. The feedback between the cutter and the cutting zone determines the characteristics of the oscillations. The study considers different types of oscillatory systems with one and two degrees of freedom, which allows studying regenerative and "pure" oscillations. The development of such systems allows studying in more detail the mechanisms of excitation of self-oscillations and their influence on the turning process.

Keywords: self-oscillations, cutter-oscillator, oscillatory system, turning

1. Вступ. Вібрації під час точіння негативно впливають на якість обробленої поверхні, призводять до підвищеного зношування інструменту та обладнання, обмежують можливості скорочення часу обробки, збільшують вартість механічної обробки та створюють несприятливі умови праці для робітників [1].

Вивчення вібрацій у процесі різання триває вже понад 100 років, починаючи з фундаментальних досліджень Ф. Тейлора [2]. Автоколивання (АК) при різанні є одним із найбільш небезпечних і важко прогнозованих видів вібрацій. Вони виникають в результаті складної взаємодії коливальної системи верстата, інструменту і заготовки, при цьому критичну роль відіграють процеси, що самозбуджуються, пов'язані з координатними зв'язками і регенеративними ефектами [3].

У 1950-1960-х роках, на основі експериментальних досліджень, були розроблені теорії [4, 5, 6], які пояснюють причини виникнення АК при різанні. Також були запропоновані аналітичні методи прогнозування та вибору режимів безвібраційної обробки. У наступні десятиліття основна увага дослідників була зосереджена на розробці методів боротьби з АК для забезпечення вібростійкості верстатів [7, 8].

Однак різноманітність методів обробки – лезової та абразивної, з постійним або змінним перерізом зрізу, при безперервному або переривчастому різанні – ставить під сумнів можливість створення єдиної загальної теорії АК для процесу різання. Це ускладнює розробку універсальних практичних рекомендацій щодо гасіння АК, зокрема при точінні.

Сучасні експериментальні дослідження [9, 10], які використовують оригінальні конструкції коливальних систем на основі різців-осциляторів з одним та двома ступенями свободи коливання ріжучої кромки дозволили розширити знання про складну, координатно зв'язану автоколивальну систему процесу різання через її спрощену модель.

Метою даної роботи було дослідження автоколивної системи процесу різання при точінні, розширення знань про механізми виникнення АК при точінні з урахуванням сучасних експериментальних досліджень.

2. Аналіз досліджень та публікацій. Автоколивальні процеси самозбуджуваного характеру спостерігаються у різних коливальних системах – механічних, електричних, біологічних та інших. Встановлено, що різноманіття умов виникнення АК може бути описане загальною схемою автоколивної системи (рис. 1).

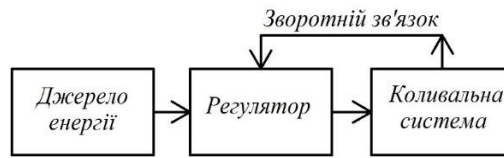


Рис. 1 – Автоколивальна система [11]

Механізм самозбудження полягає у тому, що енергія, яку система отримує від зовнішнього джерела E_+ дорівнює енергії, яку коливальна система втрачає E_- (рис. 2). У цьому випадку амплітуда коливань A стає сталою [11].

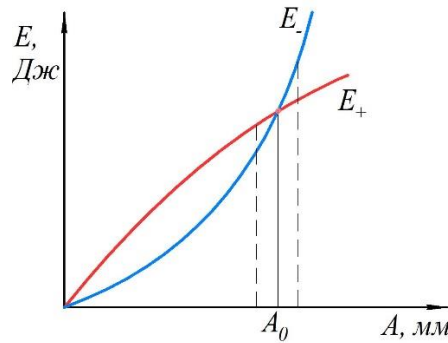


Рис. 2 – Діаграма стійкості коливальної системи [11]

Автоколивальна система – це система (пристрій), яка здатна генерувати коливання шляхом перетворення постійного руху в коливальний. Така система включає джерело постійної енергії, коливальну систему, регулятор (клапан), що пропускає енергію порціями від джерела до коливальної системи, а також зворотний зв'язок, за допомогою якого коливальна система керує роботою регулятора [11].

Фундаментальні дослідження автоколивальних процесів при різанні почалися у 1940-1960-х роках [12, 13]. Однак на той час знання про механіку різання ще тільки формувалися та систематизувалися [14, 15]. Було встановлено, що основними джерелами самозбудження коливань при різанні є координатний зв'язок та регенеративний ефект (різання по хвилястому сліду) [16].

Координатний зв'язок [17, 18] збуджує коливання між інструментом та заготовкою одночасно щонайменше у двох напрямках (рис. 3). Модель такої коливальної системи при різанні включає різець масою m , підвішений на двох пружних елементах із жорсткостями K_1 та K_2 . Одночасні коливання у напрямках X_1 та X_2 відбуваються зі зсувом фаз. У результаті траєкторія руху різальної кромки різця від точки А до точки В і назад (рис. 3) наближається до еліпса. Протягом першої половини періоду руху інструмента (від А до В) пружна реакція пружин R перевищує силу різання F . У цей момент енергія вилучається з коливальної системи. Під час зворотного руху (від В до А) сила різання F перевищує пружну реакцію R , і енергія надходить до коливальної системи [16]. Оскільки надходження енергії перевищує втрати, утворюється надлишок енергії, що підтримує стійкість коливань, незважаючи на втрати на демпфування. Але координатний зв'язок діє не завжди, якщо сила пружної системи буде вища ніж сила різання, наприклад при високій жорсткості державки різця, то АК збуджуватися не будуть. Механізм збудження АК пов'язаний з координатним зв'язком відсутній у розрахунку прогнозованих пелюсткових границь діаграми стійкості (SLD – Stability Lobes Diagram) [17].

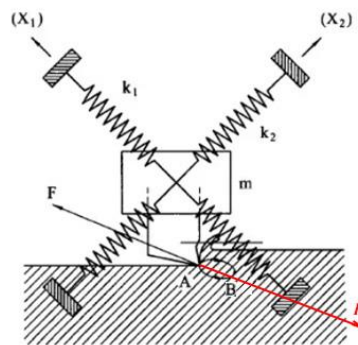


Рис. 3 – Механізм координатного зв'язку в системі з двома взаємно перпендикулярними ступенями свободи [16, 17]

Регенеративний ефект збудження АК при точінні виникає під час руху різальної кромки по хвилястий поверхні обробки, сформованій під час попереднього оберту заготовки [19, 20]. В наслідок чого, починаючи з

другого оберту, відбуваються коливання ріжучої кромки відносно товщини зрізу (вздовж осі Y) (рис. 4) [16], товщина зрізу стає змінною. Коливання товщини зрізу спричиняють коливання сили різання з частотою, наближеною до власної частоти коливань різця. Тому АК відбуваються в умовах, близьких до резонансних. Між хвилями на сусідніх поверхнях різання виникає фазовий зсув, величина якого є самоналаштовуваною характеристикою [9]. Регенеративний ефект є головним джерелом, до 80...85% внеску дії всіх джерел коливань, але він не є первинним джерелом збудження АК, оскільки він починає діяти лише з другого оберту деталі.

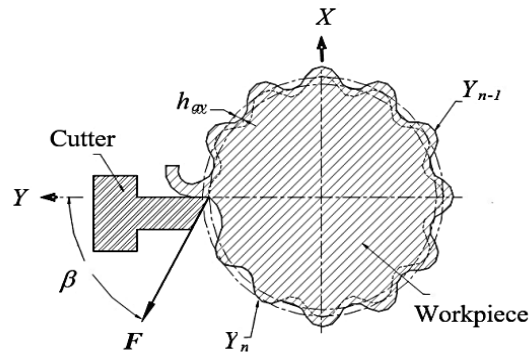


Рис. 4 – Регенерація хвилястості поверхні при точінні [1, 16]

При різанні два вище згаданих джерела коливань можуть також працювати разом (рис. 5). Джерелом постійної енергії (руху) при цьому є швидкість різання v , коливальною системою є різець з масою m , зворотній зв'язок M , за визначенням J. Tlustý, встановлюється між деталлю і інструментом (осцилятором) [16]. Аналізуючи рис. 5 можна зробити висновок, що зона різання є замикаючою ланкою між деталлю та інструментом в автоколивальній системі процесу різання. Але в своїй роботі J. Tlustý [16] не визначає, що є саме регулятором в автоколивальній системі згідно загальноприйнятою схемою автоколивальної системи.

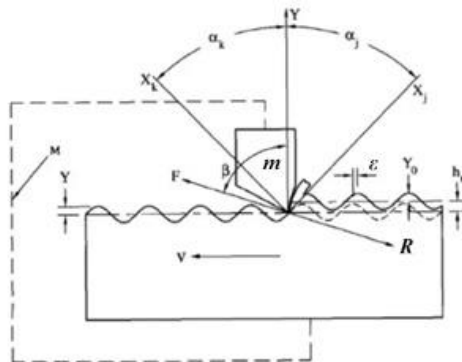


Рис. 5 – Модель автоколивальної системи різання [16]

Найважливішим аспектом експериментального дослідження автоколивальної системи при різанні є визначення впливу змін властивостей коливальної системи на реакцію регулятора, який встановлює кінцевий рівень стійких АК. Тому першочерговим завданням дослідження було чітко визначення джерела постійної енергії, регулятора, коливальної системи та зворотного зв'язку автоколивальної системи процесу різання при точінні. Наступним етапом було розробка конструкцій різців, які слугуватимуть осциляторами в коливальній системі та дозволять змінювати її властивості.

3. Опис автоколивальної системи процесу різання при точінні. Згідно проведеного аналізу сучасних експериментальних досліджень динаміки процесу різання була сформульована схема (рис. 6) автоколивальної системи при повздовжньому точінні жорсткої деталі 4, верстат вважається абсолютно жорстким, на якій показані основні ланки. Джерелом постійної енергії є електродвигун 1 обертання деталі та подачі інструменту 2. Одночасна робота цих двигунів забезпечує можливість реалізації процесу різання із постійними режимами обробки: швидкість різання, швидкість подачі різця. Консольно закріплений різець 6 має суттєво меншу жорсткість в порівнянні з деталлю, він має можливість коливання, тому він виступає в ролі коливальної системи (осцилятора) та його прийнято називати різець-осцилятор. На різці-осциляторі 6 встановлена ріжуча пластина 8, сам різець-осцилятор 6 закріплений у супорті 5.

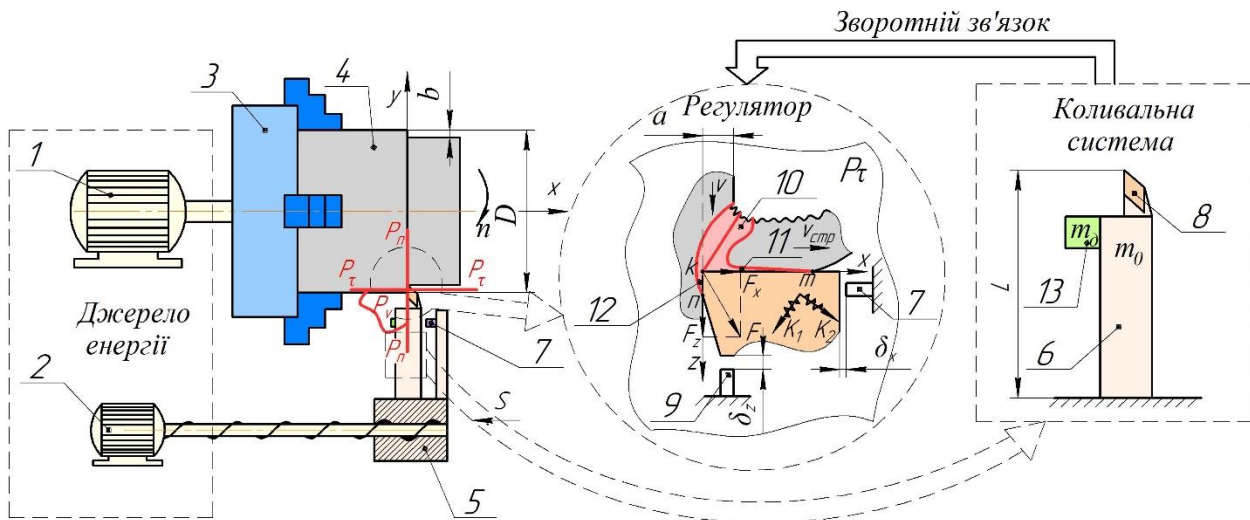


Рис. 6 – Схема автоколебальної системи процесу різання при поздовжньому точінні

Регулятором є зона різання (рис. 6), що включає зону стружкоутворення 10, майданчик контактного тертя стружки з передньою поверхнею різця km 11 та майданчик контактного тертя на задній поверхні різця з поверхнею різання на оброблюваній деталі kn 12. Державка різця-осцилятора має жорсткості K_1 та K_2 в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Зону різання розглядають у головній січній площині P_T , яка перпендикулярна лінії ріжучої кромки. У цій площині розташовуються вектори швидкості різання v і швидкості подачі S , якщо вона збігається з координатною площиною XOZ верстата.

Величина і напрямок зміщення ріжучої кромки в зрізаному шарі товщиною a , під дією сили різання F , залежить від напрямку головних осей і величини жорсткості K_1 і K_2 перерізу державки, довжини L вільоту та маси $m = m_0 + m_0^*$ різця.

Під час різання коливальна система (лезо різця-осцилятора) знаходиться в зачепленні з регулятором (зоною різання) по контактних поверхнях тертя, утворюючи взаємний силовий зв'язок. Зворотним зв'язком – це вплив коливальної системи (різця-осцилятора) на зону різання, яка є регулятором.

4. Аналіз основних властивостей автоколебальної системи при точінні. Сучасні уявлення про вібрацію автоколебальних систем підтверджують думку про складність цього явища. Згідно аналізу властивостей механічних автоколебальних систем, сформульовано основні властивості автоколебальної системи при точінні:

1) По виду відхилення осцилятора АК можуть бути майже гармонійні або релаксаційні [11]. В умовах різання розглядають майже гармонійні АК [4].

2) Незалежність АК від початкових умов збудження осцилятора [21].

3) Стійкість АК від випадкових від збуджень. Стійкість характеризується граничним циклом на фазовій площині (x, \dot{x}) [21].

4) Нелінійність енергії, що підводиться і відводиться до осцилятора за один коливальний цикл. Дозволяє забезпечувати стійке значення амплітуди АК за умови дотримання їхнього балансу. Причому нелінійними властивостями можуть мати будь-які ланки АК системи [11].

5) При АК спостерігається запізнення сил в пружному, демпфуючому та автоколебальних механізмах [8, 11]. Величину запізнення при порівнянні двох коливальних процесів оцінюють величиною фази.

6) При АК розвиваються сили змішаного характеру $F(x, \dot{x})$, які не розкладаються на суму сил $F(x) + F(\dot{x})$ [21].

7) У реальних процесах можуть одночасно спостерігаються змішані види коливань, наприклад вимушені, параметричні та АК [22].

Перелічені властивості АК систем становлять значні труднощі під час вирішення нелінійних диференціальних рівнянь руху із запізненням визначення закону руху осцилятора. У цьому випадку найзручнішим джерелом інформації про особливості поведінки АК системи в умовах різання є експериментальна осцилограма (закон) руху різців-осциляторів різних конструкцій.

5. Аналіз впливу режимів різання на збудження АК під час точіння. Багато науковців [23, 24] вважають, що найбільш значущим параметром режиму різання, який безпосередньо впливає на збудження вібрацій, є глибина різання t , яку зручно розглядати як ширину перерізу зрізаного шару b . Це пояснюється тим, що збільшення параметра b прямо пропорційно збільшує силу різання F (рис. 7, а). В більшості досліджень вібраційну стійкість верстата [4, 7] оцінювали за значенням граничної ширини зрізу b_{lim} , при якій починають збуджуватися недопустимі рівні вібрацій верстата $A_{AK}^{доп}$. Застосування критерію b_{lim} дозволило простим

способом проводити порівняльну оцінку вібраційної стійкості різних верстатів та удосконалювати їх конструкцію. Однак з точки зору вивчення динаміки процесу різання, де зона різання виконує роль регулятора в автоколивальній системі, який впливає на процес збудження АК, ширина зрізу b є малозначущим параметром. Це пов'язано з тим, що пружно-деформаційні процеси стружкоутворення в механіці різання розглядаються як плоска задача у головній січній площині P_r . Іншими словами, у кожній точці по довжині різальної кромки fk (рис. 6) процес стружкоутворення залишається незмінним. Експериментально це підтверджується тим, що усадка стружки, яка визначає рівень деформації при різанні, не залежить від зміни ширини зрізу b [25].

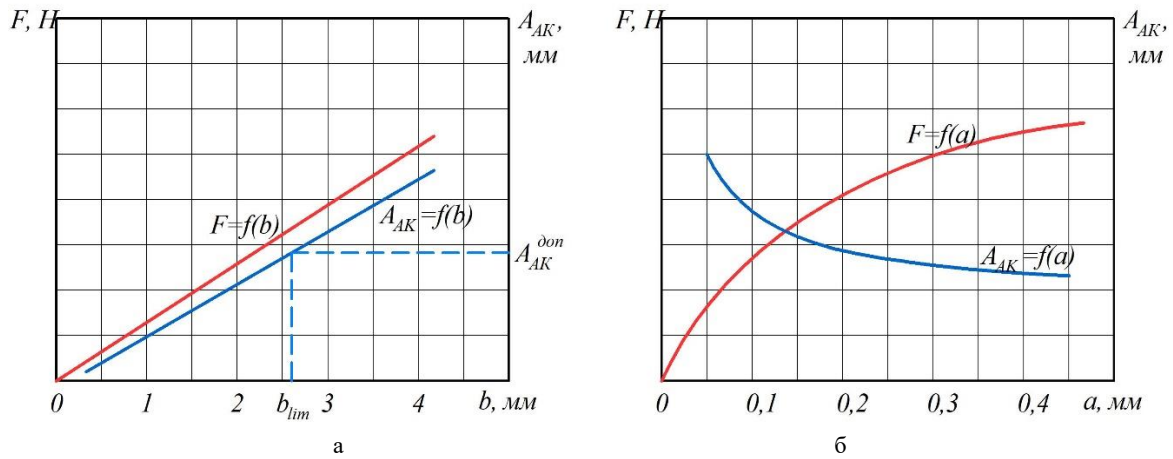


Рис. 7. Вплив ширини (а) та товщини (б) зрізу на силу різання F та амплітуду A_{AK} [25]

Таким чином, застосування параметра b_{lim} під час розробки SLD у 1960-х роках [5, 6] не враховувало особливості формування зони різання за різних умов обробки та зводилося лише до визначення b_{lim} від частоти обертання деталі при точінні або від зубцевої частоти при фрезеруванні при яких процес різання був вібростійким. Попри це, сьогодні метод SLD залишається базовим інструментом для аналітичного прогнозування безвібраційних умов різання для найрізноманітніших видів обробки у частотному діапазоні [26].

Згідно аналізу проведених досліджень [25, 27] зміна подачі S (товщини зрізу a), показує відсутність пропорційного зв'язку між силою різання F та інтенсивністю АК (амплітудою) (рис. 7, б)

Таку ж саму залежність в багатьох дослідженнях [10, 25] показує швидкість різання v , а також ширина площадки зношення h_3 на задній поверхні різця – відсутність пропорційного зв'язку між силою різання F та інтенсивністю АК (рис. 8 а, б).

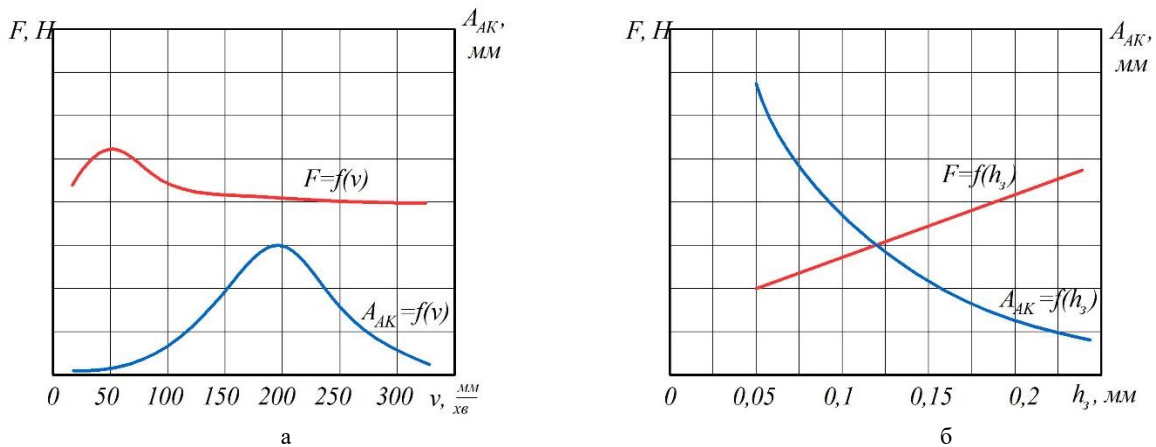


Рис. 8. Вплив швидкості різання (а) та площадки зношення на задній поверхні різця (б) на силу різання F та амплітуду A_{AK} [10, 25]

6. Конструкція різців-осциляторів. Як зазначалося раніше різець-осцилятор в автоколивальній системі при точінні жорсткої деталі є коливальною системою. При цьому кількість ступенів свободи яку він має визначає кількість джерел автоколивань які діють на нього. Також кількість ступенів свободи визначає характер траєкторії руху різальної кромки різця-осцилятора під час його коливань у зрізаному шарі оброблюваного матеріалу. Якщо різець-осцилятор є призматичним стрижнем (рис. 6) довжиною L , жорстко закріпленим у різцетримачі, то залежно від розташування різальної кромки та співвідношення розмірів перерізу державки h/b

(рис. 9), він може мати різну кількість ступенів свободи. Основні схеми різців-осциляторів із різними ступенями свободи за умови, що напрям дії сили (НДС) різання F знаходиться під кутом α до осі z наведено на рис. 9.

Різальна кромка звичайного прохідного різця (рис. 9, а) з головним кутом в плані 90° має три ступені свободи під дією сили F : відхилення вздовж вісей x , y , z від дії сили F_z , горизонтальне відхилення вздовж осі x від сили F_x , а також поворот проти годинникової стрілки під дією моменту $M=F \cdot r$, що виникає під час кручення стрижня різця. При одночасних коливальних рухах різальна кромка описує складну просторову траєкторію.

В свою чергу, конструкція різця-осцилятора передбачає встановлення ріжучої пластинки з головним кутом в плані 90° , переднім кутом 0° , кутом нахилу ріжучої кромки 0° , ріжуча кромка розміщена на вісі жорсткості державки різця-осцилятора (рис. 6). Це, по-перше, забезпечує відсутність радіальної складової сили різання, крутильних коливань, різець-осцилятор має два ступеня свободи і вигинається в площині XOZ (рис. 9, б). Траєкторія руху різальної кромки в цьому випадку наближається до еліпса. По-друге, цим забезпечується співпадіння координатних площини верстату (XOZ , YOZ , XOY), в які здійснюється обертання деталі та переміщення інструмента, з координатними площинами при різанні – P_v , P_n , P_r . Жорсткість різця-осцилятора змінюється шляхом зміни вильоту, а його інерційність – шляхом прикладання до маси різця-осцилятора додаткової маси m_0 15 (рис. 6). Для вимірювання переміщень δ_x , δ_z відносно вісей x та z ріжучої кромки різця-осцилятора 6 використовуються два індуктивні датчики 7, 9 (рис. 6).

Співвідношення розмірів поперечного перерізу різця-осцилятора h/b може суттєво змінити відношення жорсткостей стрижня $K_1/K_2=h^2/b^2$ при його «косому» вигині вздовж осей z та x . Таким чином можна створити конструкцію різця-осцилятора з однією ступенню свободи (рис. 9, в), яка забезпечить траєкторію руху різальної кромки або тільки вздовж осі x , або тільки вздовж осі z у вигляді прямої лінії.

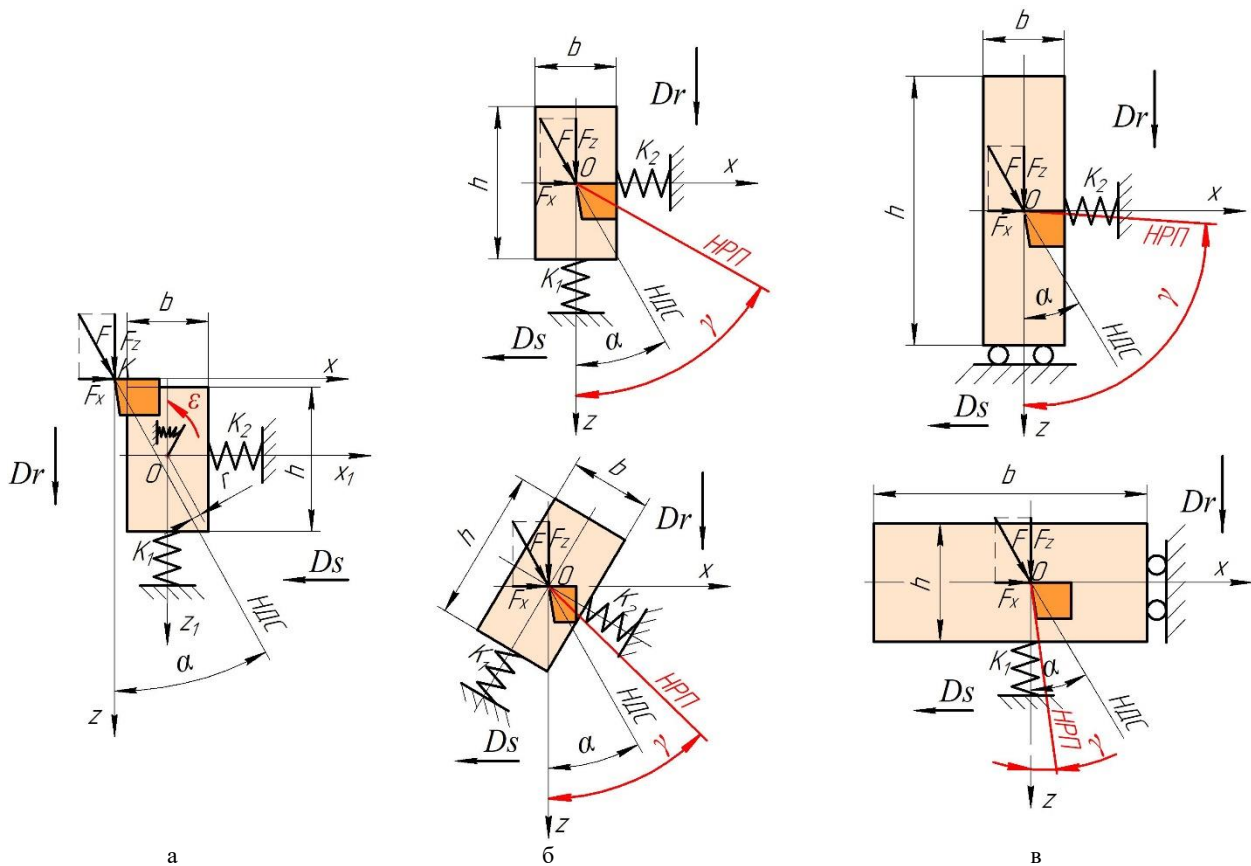


Рис. 9 – Різці-осцилятори з різними ступенями свободи: а – 3 ступеня свободи (по осі X та Z та поворот на кут ϵ); б – 2 ступені свободи; в – 1 ступінь свободи (тільки по осі x або тільки осі z).

Напрямок результуючого переміщення (НПП) ріжучої кромки під дією сили F при «косому» вигині розраховують за формулою [28]:

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\tan\alpha\left(\frac{h}{b}\right)^2\right). \quad (1)$$

Результати розрахунків НПП за формулою (1) для різних співвідношень розмірів перерізу різця-осцилятора наведено у таблиці 1 та показані на рис. 9.

Таблиця 1

$\frac{h}{b}$	8	4	2	1	0,5	0,33	0,25	0,2	0,1
$\frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{h}{b}\right)^2$	64	16	4	1	0,25	0,11	0,063	0,04	0,01
γ , deg	88,4°	83,8°	66,6°	30°	8,2°	3,6°	2,1°	1,3°	0,33°

Для співвідношення $h/b=8$ кут $\gamma = 88,4^\circ$ при цьому НРП ріжучої кромки практично збігається з віссю x , відхиляючись на $1,6^\circ$. Для $h/b=0,2$ кут $\gamma = 1,3^\circ$, а НРП ріжучої кромки практично збігається з віссю z , відхиляючись на $1,3^\circ$. Для $h/b=1$, кут $\gamma = \alpha$, НРП ріжучої кромки збігається з НДС. У цьому випадку, якщо в перерізі державки різця-осцилятора буде круг, то його жорсткість у будь-якому напрямку при косому згині буде незмінною.

Таким чином, шляхом зміни тільки співвідношення розмірів перерізу державки різця-осцилятора h/b можна отримати умови колювання ріжучої кромки або по осі x або тільки осі z тобто створити різні колювальні системи з одним ступенем свободи. У цих випадках виключають вплив координатного зв'язку.

Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі x дозволяє вивчати вплив колювань лише товщини зрізу на збудження вібрації (регенеративний ефект) [28]. Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі z , дозволяє вивчати вплив колювань миттєвої (реальної) швидкості різання. Він виключає відхилення ріжучої кромки по осі x , усуваючи цим появу хвилі на поверхні різання та вплив умови різання «по вібраційному сліду», без колювання реальної товщини зрізу. Траєкторія руху ріжучої кромки різця-осцилятора, який має два ступені свободи по осі x і z , має форму близьку до еліпсу. Якщо різець-осцилятор має круглий переріз державки він має постійну жорсткість в будь-якому напрямку дії сили різання. Це дозволяє вивчати таким різцем-осцилятором вплив пов'язаних колювань по осях x та z на інтенсивність вібрації.

Висновки. Згідно проведеного дослідження автоколювальної системи процесу різання при точінні жорсткої деталі, верстат вважається абсолютно жорстким, встановлено, що джерелом постійної енергії є електродвигун обертання деталі та подачі інструменту. Різець в цьому випадку має суттєво меншу жорсткість в порівнянні з деталлю, він має можливість колювання, тому він виступає в ролі колювальної системи (осцилятора) та його прийнято називати різцем-осцилятором. Регулятором є зона різання, що включає зону стружкоутворення, майданчик контактної тертя стружки з передньою поверхнею різця та майданчик контактної тертя на задній поверхні різця з поверхнею різання на оброблюваній деталі. Під час різання колювальна система (лезо різця-осцилятора) знаходиться в зачепленні з регулятором (зоною різання) по контактних поверхнях тертя, утворюючи взаємний силовий зв'язок. Зворотним зв'язком – це вплив колювальної системи (різця-осцилятора) на зону різання, яка є регулятором.

Розробка колювальних систем (різців-осциляторів) з одним ступенем свободи дозволяє виключити вплив координатного зв'язку і в реальних умовах різання спостерігати різні механізми збудження автоколювань. Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі x , дозволяє вивчати особливості автоколювань при різанні тільки «по вібраційному сліду» відомі як регенеративні колювання. Різець-осцилятор, який має лише один ступінь свободи по осі z , дозволяє вивчати особливості збудження автоколювань при різанні лише «по чистому», без впливу регенеративних колювань. Різець-осцилятор має два ступені свободи та однакову жорсткість у будь-якому напрямку колювального руху дозволяє вивчати пов'язані колювання без координатної залежності напрямку осей жорсткості осцилятора щодо координатної системи різання XOZ.

Список літератури:

1. Özer A. Numerical Evaluations for Robotic Turning with a Scheduled Modulatory Gain-Based Chatter Controller / A. Özer, A. Sekiguchi // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – 56(2). – P. 11111-11116. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.823>
2. Taylor F.W. On the art of cutting metals / Frederick Winslow Taylor. – New York : Published by the American society of mechanical engineers, 1907. – 248p.
3. Mao S. H. On the existence of mode-coupling chatter in robotic milling based on chatter type indicators extracted by dynamic mode decomposition / S. H. Mao, S. T. Ye, Y. R. Jiang, C. Q. Shen, X. J. Zhang, S. J. Yan, H. Ding // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2024. – 220, – P. 111591. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111591>
4. Тлустый М. Автоколебания в металлорежущих станках : пер. с чешск. / М. Тлустый. – М. : Машгиз, 1956. – 395 с.
5. Tobias S.A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S.A. Tobias, W. Fiswick. – London: Engineering, 1958. – 258 p
6. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H.E. Merritt // Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87. – P. 447-454 <https://doi.org/10.1115/1.3670861>
7. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с
8. Эльясберг М.Е. Автоколебания металлорежущих станков / М.Е. Эльясберг. –П : Издание ОКБС, 1993. – 180 с.
9. Tryshyn P. Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting / P. Tryshyn, Y. Vnukov, O.Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 342-357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31
10. Vnukov Y. Experimental research on regenerative self-oscillations during turning / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 358-372. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32
11. Харкевич А. А. Автоколебания. 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 176 с.

12. Tobias S. A. The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions / S.A. Tobias, W.A. Fishwick // *Trans. of ASME*. – 1958. – Vol. 80. – P. 1079–1088.
13. Arnold R.N. The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel / R.N. Arnold // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – London, 1946. – Vol. 154. – P.261–276
14. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н.Зорев. – М. : Mashgiz, 1956. – 368 с.
15. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А.П. Соколовский // *Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов: сб. научн. тр.* -М.: Mashgiz, 1958.– С.3–23.
16. Tlusty G., *Manufacturing Equipment and Processes*. – NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2000. – 928p.
17. Celikag H. Can mode coupling chatter happen in milling? / H. Celikag, E. Ozturk, N. D. Sims // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2021. – 165. – P. 103738. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103738>
18. Yuan L. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber / L. Yuan, S. Sun, Z. Pan, D. Ding, O. Gienke, W. Li, // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – 117, P. 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.07.051>
19. Mohammadi Y. Finite-amplitude stability in regenerative chatter: The effect of process damping nonlinearity and intermittent cutting in turning / Y. Mohammadi, K. Ahmadi // *Journal of Sound and Vibration*. – 2022. – 537. – P. 117158. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117158>
20. Wang A. Dynamics of the regenerative turning chatter with little mass eccentricity / A. Wang, B. Zhou, W. Jin // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2024. – 166. – P. 104851.
21. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара Л. : *Машиностроение* 1976, 320 с.
22. Алифов А. А. Смешанные вынужденные, параметрические и автоколебания при неидеальном источнике энергии и запаздывающих силах // *Известия вузов. ПНД*. 2021. Т. 29, вып. 5. С. 739-750. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-5-739-750
22. Nam S. Analytical prediction of chatter stability for modulated turning / S. Nam, B. Eren, T. Hayasaka, B.S encer, E. Shamoto // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2021. – 165. P. 103739. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103739>
23. Ahmadi K. Bayesian updating of modal parameters for modeling chatter in turning / K. Ahmadi // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2022. – 38. P. 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.006>
24. Основы теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. ; за заг. ред. М. П. Мазура. – 4-те вид., переробл. і допов. – Львів : Новий Світ-2000, 2022. – 471 с. – ISBN 978-966-418-105-82.
25. Itintas Y. Chatter Stability of Machining Operations / Itintas, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., Kilic, J. Z. M. // *Manuf. Sci. Eng.* – 2020. – 142(11). – P. 110801 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4047391>
26. Кучма, Л.К. Вибрации при работе на фрезерных станках и методы их гашения/ Л.К. Кучма. – М.: СССР, 1959. – 122с.
27. Vnukov Y. Cutter-Oscillator with Single-Degree-of-Freedom for the Study of Cutting Vibrations. / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // *Strojnický časopis-Journal of Mechanical Engineering*. – 2024. – 74(1). – P. 169-180. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>.

References (transliterated)

1. Özer A. Numerical Evaluations for Robotic Turning with a Scheduled Modulatory Gain-Based Chatter Controller / A. Özer, A. Sekiguchi // *IFAC-PapersOnLine*. – 2023. – 56(2). – P. 11111-11116. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.823>
2. Taylor F.W. On the art of cutting metals / Frederick Winslow Taylor. – New York : Published by the American society of mechanical engineers, 1907. – 248 p.
3. Mao S. H. On the existence of mode-coupling chatter in robotic milling based on chatter type indicators extracted by dynamic mode decomposition / S. H. Mao, S. T. Ye, Y. R. Jiang, C. Q. Shen, X. J. Zhang, S. J., Yan, H. Ding // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2024. – 220, – P. 111591. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111591>
4. Tlusty M. Self-oscillations in metal-cutting machines: trans. from the Czech Republic / M. Fat - M. : Mashgiz, 1956. – 395 p.
5. Tobias S.A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S.A. Tobias, W. Fiswick. – London: Engineering, 1958. – 258 p
6. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H.E. Merritt // *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*. – 1965. – Vol. 87. – P. 447–454. <https://doi.org/10.1115/1.3670861>
7. Kudynov V.A. Dynamics of machine tools / V.A. Kudynov. - M.: Mechanical engineering, 1967. – 360 p
8. Elyasberg M.E. Auto-oscillations of metal-cutting machines / M.E. Elyasberg. -P: OKBS edition, 1993. – 180 p.
9. Tryshyn P. Experimental verification of the impact of phase shift between neighboring waves on the intensity of regenerative oscillations during continuous cutting / P. Tryshyn, Y. Vnukov, O.Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 342-357. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_31
10. Vnukov Y. Experimental research on regenerative self-oscillations during turning / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Cham: Springer Nature Switzerland. – 2025. – P. 358-372. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_32
11. Kharkevich A. AND. Self-oscillations. 2nd ed. - M.: Book house "LYBROKOM", 2009. - 176 p.
12. Tobias S. A. The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions / S.A. Tobias, W.A. Fishwick // *Trans. of ASME*. – 1958. – Vol. 80. – P. 1079–1088.
13. Arnold R.N. The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel / R.N. Arnold // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – London, 1946. – Vol. 154. – P.261–276
14. Zorev N.N. Questions about the mechanics of the metal cutting process / N.N. Zorev. - M. : Mashgiz, 1956. – 368 p.
15. Sokolovsky A.P. Vibrations when working on metal cutting machines / A.P. Sokolovsky // *Research on oscillating metal cutting machines when cutting metals: Sat. scientific tr.* - M.: Mashgiz, 1958.– P.3–23.
16. Tlusty G., *Manufacturing Equipment and Processes*. – NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2000. – 928p.
17. Celikag H. Can mode coupling chatter happen in milling? / H. Celikag, E. Ozturk, N. D. Sims // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2021. – 165. – P. 103738. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103738>
18. Yuan L. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber / L. Yuan, S. Sun, Z. Pan, D. Ding, O. Gienke, W. Li, // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – 117, P. 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.07.051>
19. Mohammadi Y. Finite-amplitude stability in regenerative chatter: The effect of process damping nonlinearity and intermittent cutting in turning / Y. Mohammadi, K. Ahmadi // *Journal of Sound and Vibration*. – 2022. – 537. – P. 117158. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117158>
20. Wang A. Dynamics of the regenerative turning chatter with little mass eccentricity / A. Wang, B. Zhou, W. Jin // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2024. – 166. – P. 104851.
21. Panovko Y.H. Fundamentals of the applied theory of vibration and shock L. : *Машиностроение* 1976, 320 p.
22. Alifov A. AND. Mixed forced, parametric and self-oscillations with a non-ideal source of energy and retarding forces // *Izvestiya uzov. PND* 2021. Vol. 29, issue 5. S. 739-750. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2021-29-5-739-750>.
23. Ahmadi K. Bayesian updating of modal parameters for modeling chatter in turning / K. Ahmadi // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2022. – 38. P. 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.006>

24. Fundamentals of the theory of cutting materials: a textbook [for higher educational institutions] / M. P. Mazur, Yu. M. Vnukov, A. I. Grabchenko and others; ed. by M. P. Mazur. – 4th ed., revised and supplemented – Lviv: Novyj Svit-2000, 2022. – 471 p. – ISBN 978-966-418-105-82.
25. Itintas Y. Chatter Stability of Machining Operations / Itintas, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., Kilic, J. Z. M. // *Manuf. Sci. Eng.* – 2020. – 142(11). – P. 110801 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4047391>.
26. Kuchma, L.K. Vibrations when working on milling machines and methods of their suppression / L.K. Hairy fur cap. - M.: USSR, 1959. - 122 p.
27. Vnukov Y. Cutter-Oscillator with Single-Degree-of-Freedom for the Study of Cutting Vibrations. / Y. Vnukov, P. Tryshyn, O. Kozlova, S. Dyadya // *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering.* – 2024. – 74(1). – P. 169-180. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0017>.

Відомості про авторів / About the Authors

Внуков Юрій Миколайович (Vnukov Yurii) – доктор технічних наук, професор, незалежний вчений, Valley Village, LA, California, USA; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-0018>; e-mail: urahar@ukr.net.

Тришин Павло Романович (Tryshyn Pavlo) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Технологія машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3301-5124>; тел.: (066) 148-92-76; e-mail: trishin87@gmail.com.

Козлова Олена Борисівна (Kozlova Olena) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Технологія машинобудування» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5913>; тел.: (050) 486-54-27; e-mail: kozlova@zp.edu.ua.