

Я.А. Степчин, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

Стаття присвячена розгляду особливостей динаміки процесу високошвидкісного торцевого фрезерування. Перевагою високошвидкісної обробки є значне зростання швидкості різання, що і обумовлює доцільність її використання для підвищення продуктивності. Також забезпечується оптимальне перерозподілення виділеного тепла (з видаленням основної його частини з зони різання разом зі стружкою) та зменшуються сил різання. Важливе значення має оцінка динамічної стабільності процесу високошвидкісної обробки, тому що навіть відносно невелике зростання віброактивності процесу при надвисоких швидкостях різання може призвести до пошкодження заготовки, руйнування інструменту, кінематичних ланцюгів верстата чи пристосувань.

У роботі виконано аналіз неоднозначності впливу надвисоких швидкостей різання на стійкість технологічної обробної системи. На основі розробленої динамічної моделі коливань торцевої фрези виконано дослідження стійкості процесу високошвидкісного фрезерування різними типами фрез з врахуванням зміни значень деформативного та дисипативного коефіцієнтів.

Порівняльний аналіз торцевого фрезерування фрезами різних конструкцій показав більш високий рівень динамічної стійкості процесу високошвидкісної обробки при однакових значеннях деформативного та дисипативного коефіцієнтів.

Ключові слова: автоколивання; динаміка; математична модель; різання; високошвидкісне торцеве фрезерування.

Постановка проблеми. Постійне зростання продуктивності лезової обробки та вимог до якості оброблених поверхонь призводить до необхідності використання процесів високошвидкісної обробки. А для протяжних (великорозмірних) плоских поверхонь – високошвидкісного чистового торцевого фрезерування. Основною особливістю високошвидкісної обробки є значне зростання швидкості різання, що і обумовлює доцільність її використання для підвищення продуктивності. Забезпечення, за рахунок високої швидкості, оптимального перерозподілення виділеного тепла (з видаленням основної його частини з зони різання разом зі стружкою) та зменшення сил різання – основні переваги самого процесу високошвидкісної обробки.

Ці переваги досягаються при збільшенні швидкості різання вище за загальноприйнятну межу. Наприклад:

- при фрезеруванні алюмінію високошвидкісна обробка починається зі швидкості 1500 м/хв. і може сягати значень 18000 м/хв. і більше [1];
- при фрезеруванні чавуну – 900...1000 м/хв. і більше [2].

Високий рівень швидкостей різання вимагає змін в конструкції металорізальних верстатів – напрямних, вузлах приводів, шпиндельних підшипниках, нових типів приводів головного руху і подач, створення нових конструкцій інструментів та визначення раціональних умов їх експлуатації.

Важливе значення також має оцінка динамічної стабільності процесу високошвидкісної обробки, тому що навіть відносно невелике зростання віброактивності процесу при надвисоких швидкостях різання може призвести до пошкодження заготовки, руйнування інструменту, кінематичних ланцюгів верстата чи пристосувань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з виконанням НДР Житомирського державного технологічного університету «Синтез способів формоутворення плоских поверхонь деталей реалізацією концепцій нестационарних процесів та урівноваження складових сил різання» 0115U002547.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження умов раціонального використання високошвидкісної обробки (у тому числі високошвидкісного фрезерування) розглядалося досить докладно [1, 2]. Пропонувалися нові конструкції інструментів, удосконалення верстатів

та оснащення. Проте дослідження особливостей динаміки високошвидкісної обробки практично не виконувалися. Не визначені обмеження, що накладаються на вибір параметрів режиму різання, конструкції інструментів та пристосувань віброактивністю процесу високошвидкісного обробки.

Мета роботи. Полягає в розгляді існуючих досліджень динаміки процесів високошвидкісної обробки різанням та визначення її основних особливостей при обробці фрезеруванням плоских поверхонь.

Викладення основного матеріалу. Застосування високошвидкісної обробки висуває більш високі вимоги до інструмента, оснащення, верстата і процесу підготовки виробництва.

Застосування крихких різальних елементів з твердого сплаву, мінералокераміки, а особливо з надтвердих матеріалів висуває жорсткі вимоги до мінімізації загального рівня вібрацій при різанні. Ці вимоги також обумовлюють вибір раціональних режимів різання: для фрез, оснащених НТМ, найбільше впливає на стійкість подача на зуб, менший – швидкість, а найменший – глибина різання [2].

Залежно від оброблюваного матеріалу обирається інструментальний матеріал, що обумовлює абсолютні значення параметрів режиму різання: з точки зору динаміки процесу – абсолютне значення сили різання, періодичність та величина її зміни (коливання), швидкість різання та частота обертання фрези.

З аналізу спрощеної лінійної моделі динамічної системи верстата (запропонована Кудіновим В.А.), що складається з двох основних елементів: еквівалентної пружної системи ЕПС (що містить, власне пружну систему, процес тертя і процеси в двигуні) і процесу різання [3, 4], впливає, що при гарантованій стійкості ЕПС зростання швидкості різання необмежено підвищує стійкість процесу. Але наведена однозначність обмежена певними умовами:

1. Лінійністю коефіцієнтів рівнянь, що описують поведінку коливальної системи.
2. Відсутністю обробки «по сліду» від попереднього проходу різального леза.
3. Відсутністю зношування різального леза (в першу чергу, по задній поверхні).

При невиконанні навіть однієї з умов зростання стійкості системи при збільшенні швидкості різання не гарантовано. Так, при збільшенні фаски зношування по задній поверхні різального леза, складова, що обумовлює загальну нестабільність процесу різання, зростає пропорційно квадрату ширини фаски зношування [6].

При обробці «по сліду», згідно з критерієм Найквіста, динамічна система верстата досягає межі стійкості тоді, коли зі збільшенням зусилля різання графік амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнutoї системи з запізненням перетинає точку негативною гілки дійсної осі комплексної площини з координатою -1. Відповідно, обробка слідами вібрацій знижує граничне значення ширини зрізаного шару (граничну стружку) не менше, ніж у два рази. Верхня межа цього зменшення не обмежена [3].

Важливим для врахування неоднозначності впливу надвисоких швидкостей різання на стійкість ТОС є робота [7], в якій аналіз стабільності ТОС виконано за розробленою блок-схемою контуру автоколивань (рисунк 1). Ця блок-схема, фактично, є більш детальною схемою замкнутої динамічної системи, що запропонована у [4] і містить два контури зворотного зв'язку: первинного негативного за відносним положенню інструменту і заготовки та вторинного позитивного за відставанням цього положення за час одного оберту заготовки.



Рис. 1. Блок-схема автоколивального контуру

Результатом аналізу є діаграма стійкості, в координатах частота обертання шпинделя – співвідношення статичних жорсткостей сили різання і динамічної системи k_c/k_m (рис. 2), що визначає значно складнішу залежність динамічної стійкості ТОС від швидкості різання, частоти обертання заготовки (інструменту) та коефіцієнтів рівнянь опису поведінки системи. З діаграми (рис. 2) слідує, що при великих швидкостях різання, які лежать правіше нульової області нестійкості, регенеративний ефект поступово послаблюється, що позитивно позначається на стабільності ТОС. Частота автоколивань вздовж пелюсткової межі стабільності змінюється не плавно, а стрибкоподібно при частотах обертання шпинделя, які забезпечують найбільшу стабільність обробки і відповідають приблизно фазовому зсуву $\nu = 1,0$.

Представлена діаграма стійкості враховує токарну обробку одним лезом та лінійну модель ТОС. При багатолезовій обробці стійкість вірогідно може бути забезпечена при значно нижчих обертах – залежно від кількості різальних лез (ножів фрези). Слід враховувати обмеженість застосування цієї діаграми стійкості при фрезеруванні, що обумовлюється вимогами до симетричного розташування ножів фрези в радіальному напрямку, за кутом та глибиною. Це ставить під сумнів використання цілих груп торцевих фрез прогресивних конструкцій з груповою схемою різання та розташуванням різальних елементів по спіралях з різними кутковими чи лінійними кроками, косокутної геометрії різальних кромки та безвершинної форми різальної частини [5, 8, 10], які показали позитивне практичне застосування.

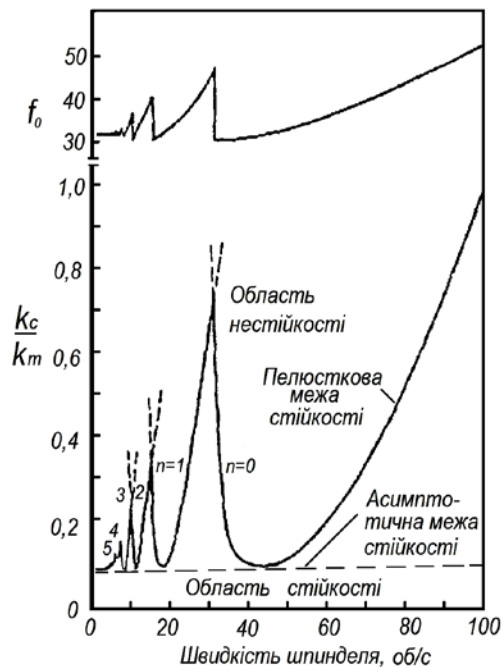


Рис. 2. Діаграма стійкості для системи з одним ступенем вільності

Важливим для оцінки поведінки ТОС при швидкісному різанні є максимальне наближення моделі до реальної обробної системи. Так у [9] було досліджено ТОС при врахуванні нелінійної жорсткості системи і статичної характеристики сили різання, представлених у вигляді поліномів третього ступеня. Отримано два загальні висновки:

- нелінійності визначають обмеження амплітуди автоколивань: при перевищенні глибиною (шириною) різання межі стійкості амплітуда автоколивань швидко зростає, а потім стабілізується на певному рівні. Цей висновок в цілому позитивний, але для випадку високошвидкісного різання з жорсткими обмеженнями до зростання коливань неприйнятний;
- можливість «жорсткого» збудження автоколивань при швидкостях різання, які відповідають додатковим областям стабільності, якщо жорсткість ТОС обмежена. Тобто пелюсткові зони стійкості (рис. 2) при врахуванні нелінійності значно звужуються залежно від жорсткості реальної обробної системи.

Позитивний вплив збільшення швидкості різання (частоти обертання фрези) на пригнічення автоколивального процесу при фрезеруванні підкреслено у [11]. Введення змінного куткового кроку

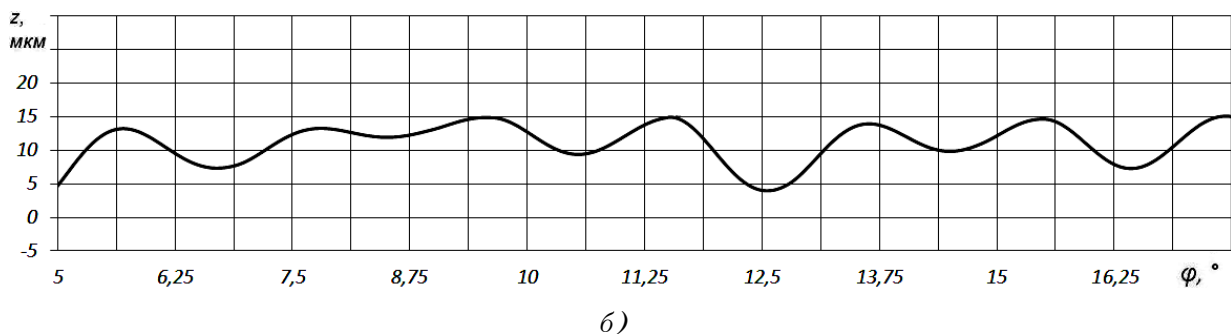
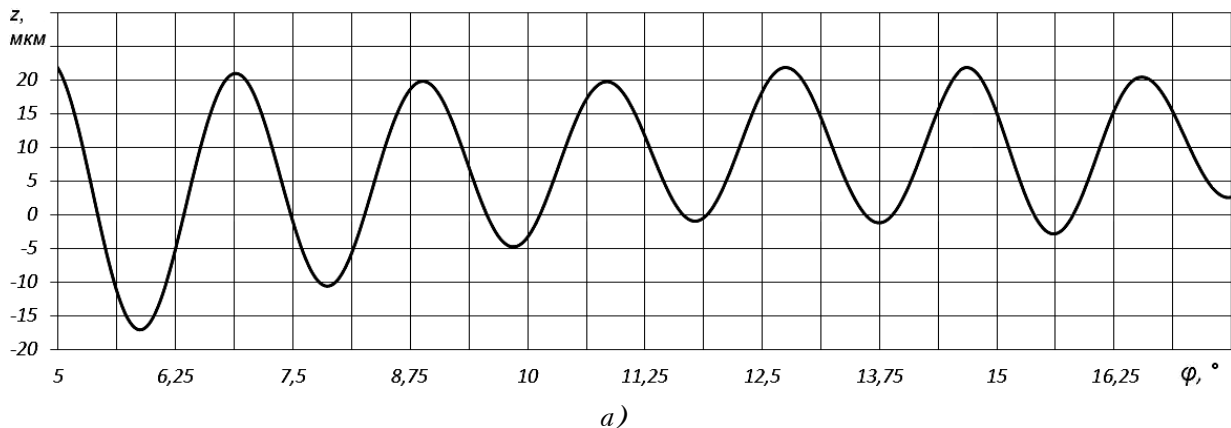
розташування різальних елементів унеможливило підстроювання коливальної системи під період хвилі на поверхні різання від попереднього проходу. Рішення є ефективним при низьких власних частотах коливань домінуючої системи та високій кутовій швидкості фрези, коли процес встановлення автоколивань більший за час проходу двох сусідніх різальних елементів.

Спираючись на експериментальні дані автоколивальних процесів, що виникають при торцевому фрезеруванні [11, 12], та на підставі теоретичного аналізу коливань підсистеми інструмента [13], було визначено, що збільшення амплітуди крутильних коливань фрези є найбільш прийнятним, порівняно з коливаннями радіальними чи осьовими, тому що вони поглинають енергію, що надходить в коливальну систему, не “розхитуючи” останню, і, відповідно, сприяють підвищенню її вібробезпечності.

На основі розробленої математичної моделі [14] було виконано теоретичні дослідження поперечних коливань торцевої фрези за умов високошвидкісної обробки – чистового фрезерування конструкційної сталі фрезами стандартних конструкцій та фрезами з нерівномірним кроком розміщення різальних елементів. Визначалися умови виникнення тривалого автоколивального процесу у підсистемі інструмента. Основні характеристики пружної системи верстата приймалися незмінними.

На рисунку 3 представлено діаграми зміщення фрези по осі z (за розрахунковою схемою з [14]) для випадку високошвидкісного фрезерування конструкційної сталі стандартною торцевою фрезою діаметром 400 мм, з 32 різальними елементами, розташованими з однаковим кутовим кроком. Представлено коливальний процес, який відповідає тривалому процесу різання (від моменту входу фрези в різання на повну ширину фрезерування $B = 0,9D$ фреза виконала більше 10 обертів). В різанні бере участь від 11 до 13 різальних елементів. Інші умови: глибина різання $t = 0,5$ мм, подача на зуб фрези $s_z = 0,05$ мм, частота обертання фрези $n = 400$ хв.⁻¹ (швидкість різання $v = 500$ м/хв.). Крок інтегрування – 0,0001 с. Значення питомої сили різання при високошвидкісному фрезеруванні прийнято на 40–60 % меншим, ніж при «класичному» чистовому фрезеруванні (за даними [4, 15, 16]).

Порівняно з результатами моделювання коливальних процесів, що виникають при фрезеруванні та представлено у [13, 14], для випадку високошвидкісного різання стабільний автоколивальний процес виникає при значеннях дисипативного коефіцієнта $b_0 < 2,0 \dots 2,5 \cdot 10^3$ с/м (що є основним показником схильності системи до автоколивань, якщо не враховувати особливості оброблюваного матеріалу та зміну фазової характеристики сили різання [12]).



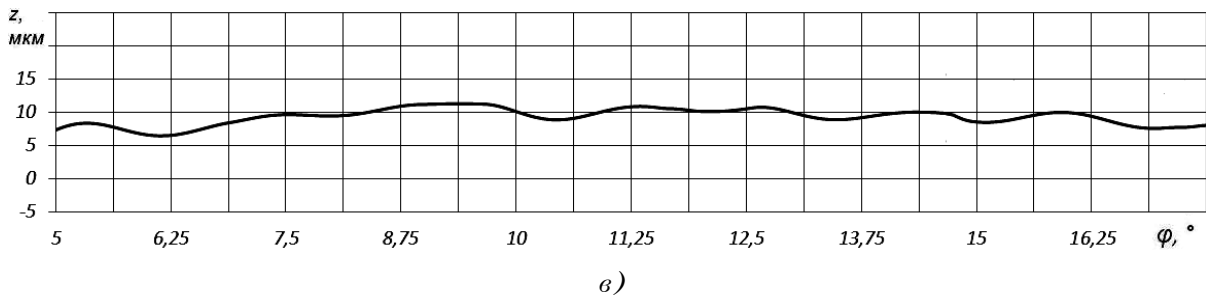


Рис. 3. Діаграми поперечних коливань стандартної торцевої фрези діаметром 400 мм (по осі z) за математичною моделлю [10]; $C = 5 \cdot 10^7$ Н/м; $a: b = 1,5 \cdot 10^3$ Нс/м; $б: b = 3 \cdot 10^3$ Нс/м, $в: b = 5 \cdot 10^3$ Нс/м

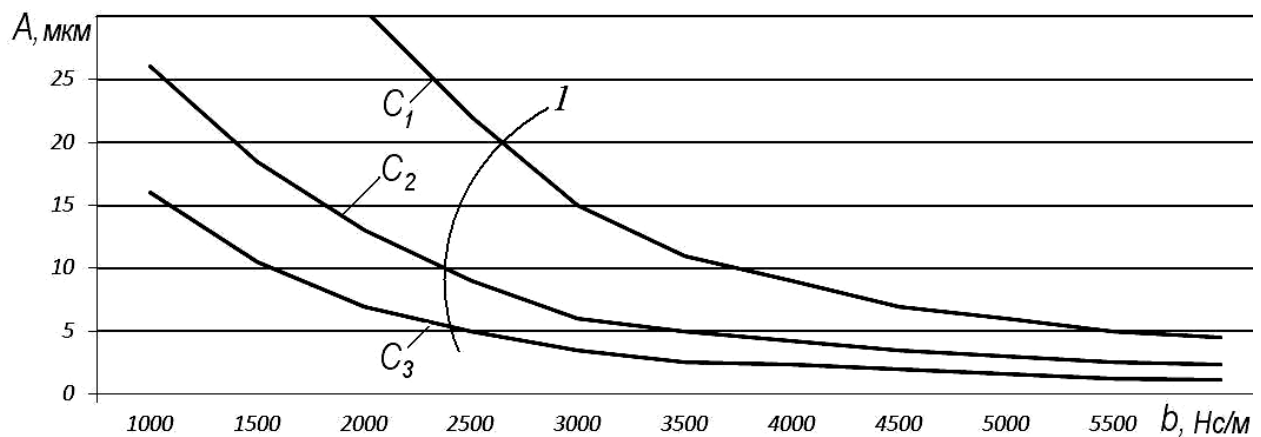


Рис. 4. Залежність амплітуди поперечних коливань торцевої фрези діаметром 400 мм (по осі z) за математичною моделлю [10] від значення дисипативного коефіцієнта: $C_1 = 2,5 \cdot 10^7$ Н/м; $C_2 = 5 \cdot 10^7$ Н/м; $C_3 = 10^8$ Н/м

На рисунку 4 представлені узагальнені залежності амплітуди поперечних коливань торцевої фрези (рис. 3) за математичною моделлю [10] від значення дисипативного коефіцієнта. Ці залежності представлені групою споріднених кривих. Для визначення допустимих параметрів обробки за умови виникнення автоколивань можна застосувати критерій: амплітудне значення коливань більше статичного зміщення фрези під дією усередненого значення сили різання (зона зліва від лінії 1, рис. 4). При зміні значень деформативного коефіцієнта C в широких межах за даним критерієм межа виникнення автоколивань відповідає значенню дисипативного коефіцієнта $b_0 = 2,3 \dots 2,6 \cdot 10^3$ Нс/м.

Висновки:

1. Коливальний процес в обробній системі для високошвидкісного фрезерування виникає при значеннях дисипативного коефіцієнта $b < 2 \dots 2,5 \cdot 10^3$ Нс/м в широкому діапазоні зміни деформативного коефіцієнта. Зменшення допустимого значення дисипативного коефіцієнта, порівняно з параметрами «класичного» чистового торцевого фрезерування, відповідає меншій силі навантаженості високошвидкісної обробки.

2. Амплітуда і частота автоколивань, в першу чергу, залежить від значень деформативного коефіцієнта. Як і в попередній дослідженнях [12, 13, 14], автоколивання відбуваються у вигляді «биття» на частотах близьких до частоти власних коливань домінуючої обробної системи (фрези). Також наявні вимушені коливання на нижчій частоті – обертання фрези (більш помітні при розвинутому автоколивальному процесі).

3. Для визначення допустимих параметрів обробки за умови виникнення автоколивань запропоновано такий критерій: амплітудне значення коливань більше статичного зміщення фрези під дією усередненого значення сили різання.

Список використаної літератури:

1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие для вузов / В.Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
2. Виговський Г.М. Особливості конструювання фрез для високошвидкісної обробки / Г.М.Виговський // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. – № 4 (63). – С. 12–22.
3. Кудинов В.А. Автоколебания на низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании / В.А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1997. – № 2. – С 16–22.
4. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
5. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. ... канд. тех. наук / Георгій Миколайович Виговський. – К. : НТУУ «КПІ», 2000. – 16 с.
6. Степчин Я.А. Рациональное использования ресурсу стійкості токарних різців в умовах віброактивності технологічної обробної системи : автореф. ... канд. тех. наук / Ярослав Анатолійович Степчин. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – 20 с.
7. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter / H.E. Merritt // ASME J. Eng. Indus. – 1965. – Vol. 87. – Pp. 447–454.
8. Патент України на винахід № 12503 «Торцева ступінчаста фреза» / Мельничук П.П., Степчиною Я.А. – Публікація 12.01.2015, Бюл. № 1. – 4 с.
9. Hanna N.H. A Theory of Nonlinear Regenerative Chatter / N.H. Hanna, S.A. Tobias // Trans, of ASME. – 1974. – Vol. 96. – Pp. 247–255.
10. Виговський Г.М. Безвершинне косокутне фрезерування. Шорсткість поверхні / Г.М. Виговський, П.П. Мельничук // Вестник НТТУ «КПІ» / Машиностроение. – 1999. – № 37. – С. 262–275.
11. 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.
12. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
13. Степчин Я.А. Математична модель динаміки торцевого фрезерування різних схем різання / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2013. – № 3 (66). – С. 37–41.
14. Степчин Я.А. Математична модель поперечних коливань торцевої фрези при чистовому фрезеруванні / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2013. – № 1 (64). – С. 11–15.
15. Высокоскоростная обработка // Оборудование: рынок, предложение, цены : приложение к журналу «Эксперт». – Вып. 1 / Технополис 2100.
16. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1990. – 320 с.

СТЕПЧИН Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металорізальних верстатів і систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

E-mail: stepchiny@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 20.11.2015