

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-04>
УДК 621.798:681.5.015.23

¹ Пономаренко С. В.
Аспірант
ORCID: 0009-0003-3260-6541
² Сапон С. П.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1082-6431

¹ Національний університет
«Чернігівська політехніка» /
Україна

² Національний технічний
університет України «Київський
політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» / Україна

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ. ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Анотація: у статті представлено огляд сучасних методів та систем активного управління вібраціями, що виникають у процесі механічної обробки, зокрема при фрезеруванні та точінні. Проведено огляд методів та засобів підвищення стабільності процесу різання за рахунок покращення динамічних характеристик ШВ та визначення оптимальних режимів обробки. Розглянуто два основні напрямки: коригування швидкості обертання шпинделя та оптимізація керуючої системи верстата. Детально проаналізовано застосування активних систем управління, що включають електромагнітні підшипники, п'єзоелектричні та інерційні віброприводи для покращення динамічних характеристик шпиндельного вузла та гасіння самозбуджених вібрацій. Наведено приклади експериментальних досліджень та математичних моделей, що підтверджують ефективність різних підходів у підвищенні стабільності процесу різання, покращенні якості обробленої поверхні та збільшенні продуктивності. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу різних алгоритмів управління, таких як PID, Fuzzy PID, BPNN та BPNN PID, а також методів гасіння збурень та стабілізації процесу різання. Окремо розглянуто застосування активних магнітних опор з різними конфігураціями (радіальні, модифіковані радіальні та вбудовані циліндричні магнітні приводи) та адаптивних систем керування на їх основі. Проаналізовано використання п'єзоелектричних приводів для активного гасіння вібрацій та представлено результати моделювання та експериментальних досліджень. Також розглянуто ефективність застосування інерційних віброприводів з різними стратегіями управління для підвищення стабільності фрезерування. На основі проведеного огляду зроблено висновок про перспективність активних методів управління вібраціями для підвищення ефективності та якості механічної обробки. Підкреслено важливість подальших досліджень у напрямку практичної реалізації та вдосконалення існуючих систем управління, особливо для обробки нежорстких деталей зі складною геометрією поверхонь, де динамічна взаємодія інструменту та заготовки відіграє значну роль.

Ключові слова: самозбуджені вібрації, стабільність різання, активне управління вібраціями, шпindelний вузол, електромагнітний підшипник, п'єзоелектричний привід, інерційний вібропривід.

ВСТУП

В сучасних умовах виробництва вимоги до якості та точності виконавчих поверхонь деталей постійно зростають у відповідь на виникнення нових високоточних сфер машино- і приладобудування. В загальному балансі точності верстатів на шпindelний вузол (ШВ) припадає до 80% похибок. Точність обертання ШВ, тобто його динамічну точність, визначають динамічні характеристики ШВ, до яких належать: частоти власних коливань, динамічна жорсткість, форми коливань на власних частотах, коефіцієнти демпфування. Перелічені характеристики описують вібростійкість ШВ та траєкторії руху його виконавчих поверхонь.

Сталим трендом останніх років в машинобудівній галузі є впровадження засобів виробництва з інтелектуальними функціями. Інтелектуальний ШВ згідно з [1] здійснює наступні функції: збір даних, обробка отриманих сигналів, управління виконавчими механізмами та видача результатів. В даній статті розглянуті інтелектуальні системи управління динамічними характеристиками ШВ для підвищення показників точності і якості обробки. Під інтелектуальним управлінням мається на увазі активне керування динамічними характеристиками ШВ, але не за усталеним законом, а за закономірностями, що адаптуються до зміни стану ШВ в процесі самонавчання.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Значна кількість сучасних досліджень процесу різання спрямована на підвищення їх стабільності, що дозволяє покращити ефективність обробки. Ці дослідження потребують систематизації для виявлення особливостей інтелектуального управління та визначення найбільш перспективних напрямків для поглибленого вивчення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний момент існують публікації оглядового характеру, що стосуються інтелектуальних (цифрових) систем управління динамічними характеристиками ШВ [2], [3] [4], [5], [6]. У роботі [6] авторів Quintana та ін. систематизовано методи забезпечення стабільності процесу різання у 2 групи: вибір комбінацій параметрів різання в стабільній зоні діаграми сталості (SLD – Stability lobe diagram) та уникання вібрації шляхом зміни поведінки системи та розширення зон стабільності. Але всі приклади в даній роботі обмежені 2011 роком. Yue та ін. проаналізував [2] сучасні методи управління динамічними характеристикам ШВ фрезерних верстатів. Mupoа та ін. в своєму огляді [3] не обмежилися фрезеруванням, але більшість проаналізованих методів не можна віднести до категорії інтелектуальних. Liu та інші також проаналізували [4] методи управління динамічними характеристиками ШВ при фрезеруванні. Але були розглянуті лише математичні моделі та симулювання процесу різання. Натомість експериментальні методи, які враховують безпосередньо всі можливі фактори впливу на процес різання, розглянуті не були. У своєму огляді [5] Sun та ін. систематизував методи забезпечення стабільної обробки тонкостінних деталей та проаналізував в тому числі і інтелектуальні методи. Але весь огляд стосувався лише фрезерної обробки, в той час, як проблема обробки деталей з малою жорсткістю актуальна і для інших типів верстатів.

даній статті розглянуто три методи управління: оптимізація керуючої системи, варіювання швидкості обертання шпинделя, активні системи управління. Відповідно метою статті є аналізування виявлених та приведених в роботі досліджень з визначенням перспективних напрямів розвитку інтелектуальних систем управління динамічними характеристиками ШВ.

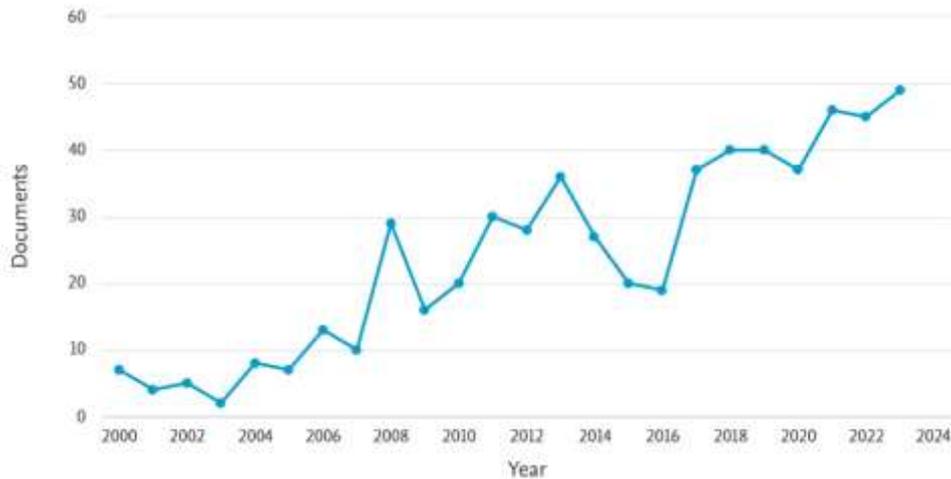


Рисунок 2 – Кількість публікацій за запитом intelligent/smart spindle по роках

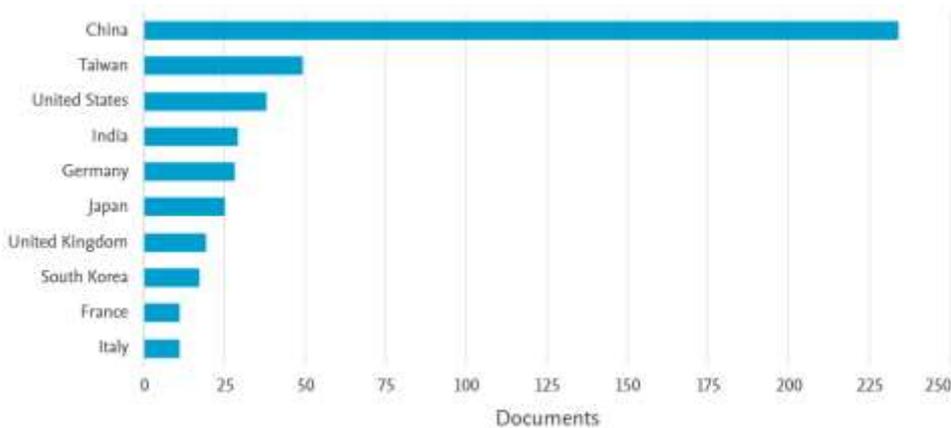


Рисунок 3 – Кількість публікацій по країнах за запитом intelligent/smart spindle

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Варіювання частотою обертання шпинделя. Зміна частоти обертання шпинделя є одним з ефективних способів зниження вібрацій, яка перериває регенеративний ефект самозбуджуючихся вібрацій. У роботі Ding Longyang [8] розробив схему гасіння самозбуджуючихся вібрацій на основі опрацювання вимірюваної сили різання. Для уникнення початку вібрацій система управління змінювала частоту обертання шпинделя. Вплив варіювання частотою обертання шпинделя на стабільність обробки також досліджував Zhenmin Li та ін. [9]. У якості вхідного сигналу для визначення виходу за межі стабільності процесу різання було обрано акустичний сигнал. При опрацюванні акустичного сигналу із зони різання визначався найкращий момент для

початку варіювання частотою обертання шпинделя. Експериментальні результати (Рисунок) підтвердили перспективність даного способу гасіння вібрацій.



а)

б)

Рисунок 4 – Поверхня заготовки оброблена при постійній (а) та при змінній (б) частоті обертання шпинделя [9]

2. Оптимізація керуючої системи. У роботі [10] розроблена математична модель контролера зі зворотнім зв'язком для затримки початку наростання вібрацій при фрезеруванні. Було запропоновано розрахунок сил приводу в ортогональних площинах при різкому наростанні амплітуди вібрацій. При симуляції процесу фрезерування даний контролер не зміг зменшити амплітуду вібрацій при стабільному процесі різання, але при роботі на нестабільних режимах величина вібрацій була значно зменшена. За рахунок використання такого контролера вдалося досягти збільшення глибини різання при стабільному процесі фрезерування (рис. 5).

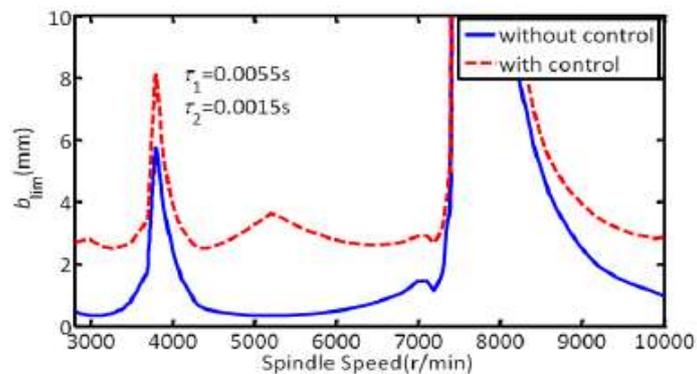


Рисунок 5 – Покращення стабільності фрезерування з контролером відкладення стану нестабільності [10]

Схожа модель управління пристроями активного контролю запропонована І. Mancisidor [11]. Суть закону управління полягає не в зміні динамічної поведінки системи, а в зменшенні регенеративного ефекту. Таке зменшення досягається введенням затримки у один оберт на зворотній зв'язок від виміряної вібрації. Період оберту зазвичай довший за затримки контролера та актуатора, тому запропонований закон дозволяє компенсувати ці затримки. Вплив даного закону на процес обробки був перевірений експериментально. З рисунку 6 видно зменшення величини вібрацій при роботі актуатора по запропонованому закону.

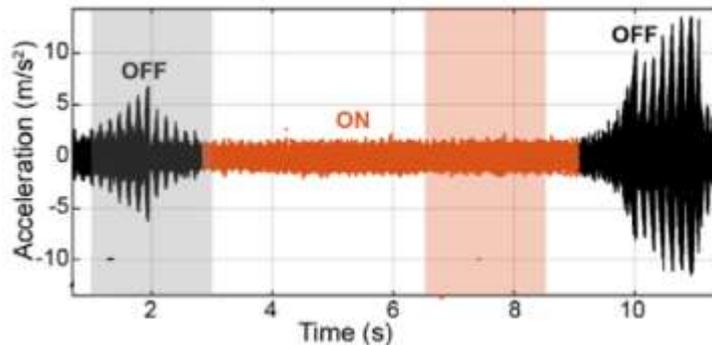


Рисунок 6 – Ефект відкладеного зворотного зв'язку від прискорення [11]

У роботі Miaoxian Guo та ін. [12] був проведений порівняльний аналіз чотирьох алгоритмів систем управління вібраціями: PID (Proportional-Integral-Derivative), Fuzzy PID, BPNN (машинне навчання за методом зворотного поширення помилки), та BPNN PID. Математичне моделювання та проведені експерименти показали (рис. 7), що BPNN PID алгоритм дозволяє серед інших найбільше зменшити амплітуду вібрацій до 70%, проте ефективність даного методу обмежена. Для того, щоб обійти обмеження ефективності, потрібно досліджувати більше алгоритмів.

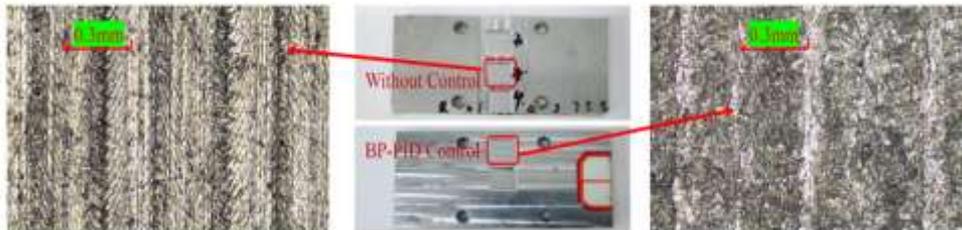


Рисунок 7 – Порівняння якості обробки без контролю вібрацій та з BPNN PID контролем [12]

У роботі [13] проведено порівняння двох підходів активного контролю вібрацій: гасінням збурень та способом стабілізації. Суть першого полягала в мінімізації впливу збурюючих сил, що виникали в процесі роботи, на зміщення інструменту. Даний підхід не враховує чітко взаємодію процесів, а спрямований на зменшення певної вхідної характеристики, за яку відповідає функція алгоритму управління. Завданням методу стабілізації є забезпечення стабільності системи для визначених умов обробки. Для порівняння було проведено математичне моделювання стабільного процесу різання для визначення відносного збільшення глибини різання при застосуванні обох схем в залежності від швидкості обертання шпинделя. Як видно з рисунку 8Рисунок, гасіння збурень сприяє розширенню нижньої межі стабільності, в той час як метод стабілізації створює зони підвищеної стабільності біля заданої частоти обертання.

У роботі Huang, T. та ін. [14] була розроблена математична модель для керування активною магнітною опорою (АМО). Запропонована модель контролювала стабільність процесу різання як при визначеній частоті обертання так і при режимах роботи зі зміною частот обертання. Було

показано, що для забезпечення контролю стабільності різання за обома схемами одночасно, треба враховувати обмеження потужності АМО. Тому в цьому випадку межі стабільності різання будуть вужчі, ніж при застосуванні кожної схеми окремо, але при цьому буде враховано вплив як статичної, так і динамічної складових сил різання на стабільність (рисунок 9).

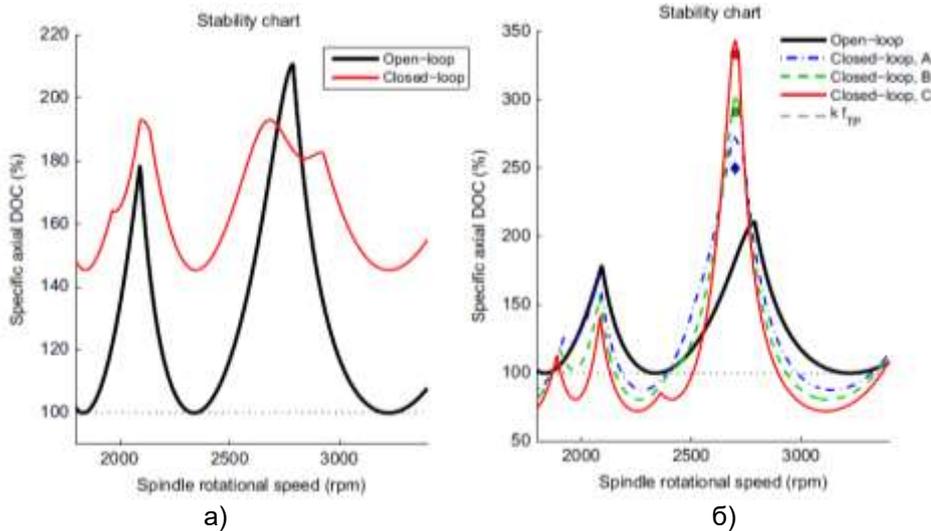


Рисунок 8 – Вплив на стабільність процесу різання гасіння збурень (а) та методом стабілізації (б) для визначеної частоти обертання 2700 хв^{-1} при різних глибинах різання [13]

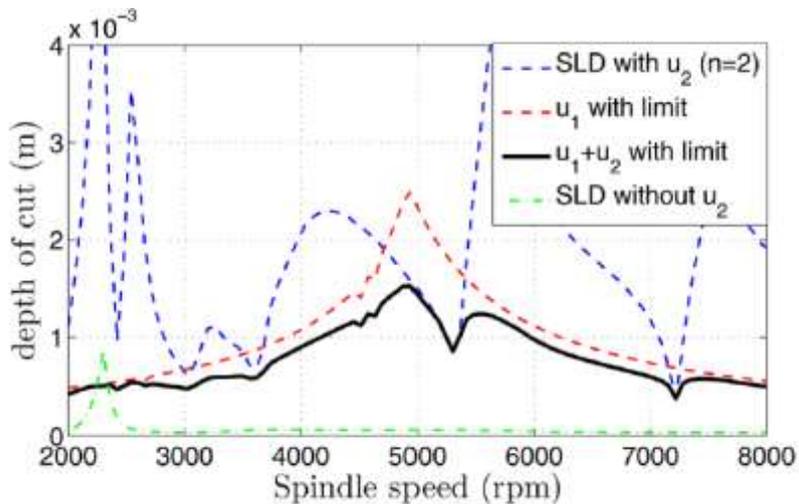


Рисунок 9 – Діаграма стабільності для різних схем управління АМО [14]

Для порівняння ефективності алгоритмів управління активними методами гасіння вібрації експерименти зручніше проводити на спеціальних стендах. Такі стенди дозволяють нівелювати швидкі зміни характеристик різального інструменту при різанні та не враховувати велику кількість параметрів процесу різання. Стенди для відтворення регенеративної вібрації були запропоновані в роботах [11] та [15] (рис. 10).

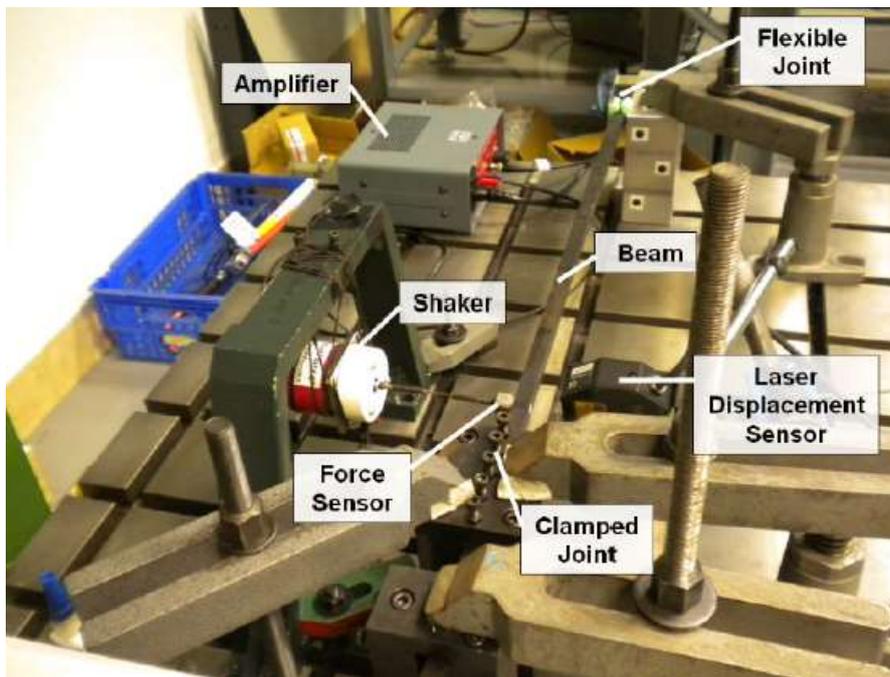


Рисунок 10 – Експериментальний стенд для моделювання регенеративної вібрації [15]

3. Активні системи управління. За характером впливу на ШВ методи гасіння вібрацій можна поділити на пасивні та активні. Пасивні методи (такі як масові демпфери [16] або підбір геометрії інструменту [17]) покращують динамічні характеристики оброблюючої системи без зовнішнього живлення. Але для цифрових систем управління найбільшу цікавість представляють активні методи зниження самозбуджених вібрацій. В основі таких методів лежить:

- спостереження за певним фактором, по якому визначається критичний рівень вібрацій;
- обробка інформації щодо зміни факторів;
- вплив виконавчого механізму на шпindelний вузол з розрахованим напрямом та потужністю.

Далі розглянемо приклади активного контролю.

3.1. Управління динамічними характеристиками за допомогою електромагнітного підшипника. Одним з варіантів управління динамічними характеристиками ШВ є використання активної магнітної опори (АМО). АМО знайшла використання як безконтактний, не потребуючий змащування левітаційно-ефективний пристрій у багатьох промислових приладах. Найбільш розповсюдженими типами АМО є радіальний [18] та модифікований радіальний [19]. Для радіального типу АМО характерне розміщення електромагнітних полюсів в одній поперечній площині, за що його також називають плоским типом (рис. 11). У модифікованій АМО електромагнітні поля направлені в повздовжньому напрямку для покращення ефективності дії магнітних сил.

Для подолання недоліків вищезгаданих типів АМО, серед яких габаритні розміри та інтенсивність сили, для процесів фрезерування було запропоновано новий вбудований в циліндричний масив магнітний привод

(ЕСАМА) [21]. Покращена форма електромагніту дозволяє збільшити кількість витків обмотки та зменшити габаритні розміри в радіальному напрямку (рис. 12)

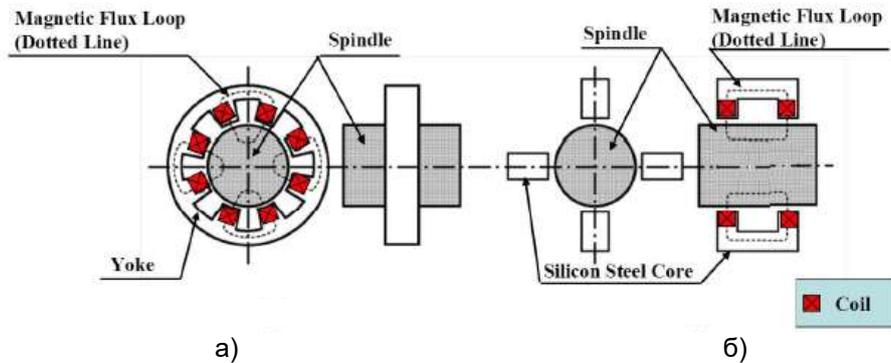


Рисунок 11 – Радіальний (а) та модифікований радіальний (б) типи АМО [20]

У роботі [20] розглянута стратегія управління ЕСАМА при фрезеруванні за допомогою адаптивного контролю. Хоча загальноприйнятий ПІД-контролер може використовуватись для керування АМО, для процесів фрезерування при швидких змінах в динаміці роботи він може призвести до збоїв. Тому було запропоновано додати алгоритм планування посилення ПІД-контролера на основі нечіткої логіки.

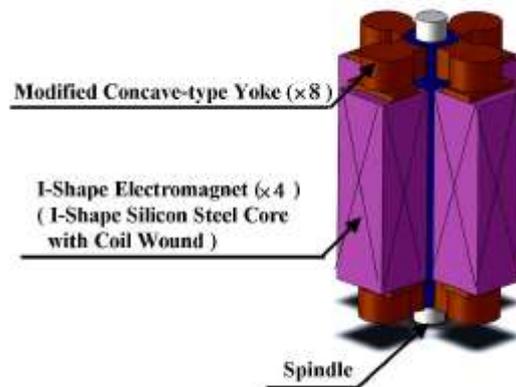


Рисунок 12 – Загальний вигляд приводу ЕСАМА [20]

Адаптивне управління може відбуватися без необхідності отримання попередньої інформації про межі невизначеностей або змінних у часі параметрів [22], [23]. Оскільки динаміка сили різання та магнітної сили є дуже нелінійною, для регулювання відхилення положення шпинделя була розроблена стратегія керування, що складається з еталонних моделей та алгоритмів нечіткої логіки. Для зменшення похибки керування застосовані математичні моделі були побудовані на експериментах, а не теоретично. Після побудови динамічних моделей зміна сили різання може бути кількісно оцінена за допомогою алгоритму нечіткої логіки відповідно до поточних умов роботи та параметрів.

При моделюванні фрезерування зі змінною глибиною різання дана система управління показала зменшення відхилення осі шпинделя в напрямку подачі більш ніж в 2 рази при різкій зміні глибини різання. Моделювання проводилося для процесу фрезерування на частоті 1000 хв^{-1} з подачею 300 мм/хв .

За результатами експериментів з фрезерування кінцевою фрезою алюмінію, акрилу та міді була досліджена динаміка сил різання та магнітної сили для зменшення оціночної похибки для запропонованого алгоритму. Траєкторія та максимальне відхилення осі шпинделя для всіх досліджуваних зразків виявилися приблизно однаковими. Так, максимальне відхилення для всіх зразків склало приблизно 30 мкм при частоті обертання 3000 хв^{-1} , подачі 300 мм/хв та сталій глибині різання $2,5 \text{ мм}$ в осьовому і 1 мм в радіальному напрямках.

Хоча запропонований алгоритм на основі нечіткої логіки досяг адаптивного посилення контролю процесом різання, але похибок оцінки остаточно позбутися дуже важко. Тому необхідно вдосконалювати правила прийняття рішень та складові функції.

У роботі Putz M. та ін. [24] представлена запатентована адаптивна система демпфування шпинделя за допомогою активного електромагнітного підшипника. Автори дослідження розмістили (рис. 13) електромагнітний підшипник між дворядними шарикопідшипниками шпиндельного вузла для управління динамічними характеристиками шпинделя і зменшення впливу власних частот. Також була розроблена адаптивна схема управління цим підшипником (рис. 14). Дана розробка націлена на інтеграцію шпиндельного вузла в загальну систему управління цехом. У металорізальних верстатах дізнатися про знос різальної кромки інструмента, підшипників шпинделя, направляючих, шарико-гвинтової пари або приводів подач можна, порівнюючи «відбиток» цього компоненту після експлуатації з «відбитком» при запуску в експлуатацію [25]. Під «відбитком» розуміють часові (імпульс сили) та амплітудно-частотні характеристики приводу. Тому, опрацьовуючи дані системи управління ШВ на верстатах в цеху, можна оперативно вносити необхідні корективи в технологічну систему.

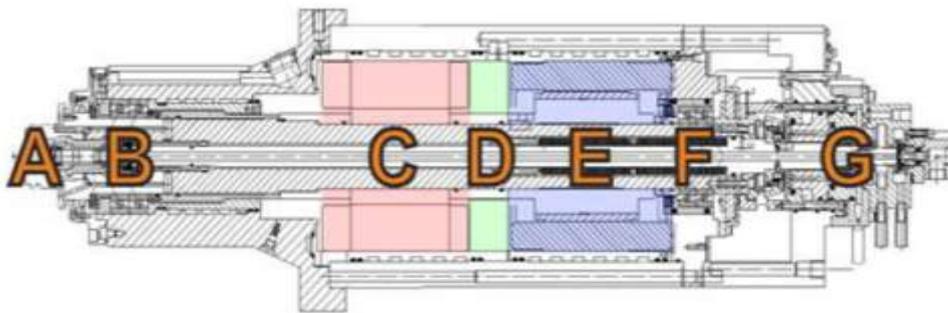


Рисунок 13 – Схема шпиндельного вузла з додатковим активним електромагнітним підшипником

A – інструментальний патрон; B, F – дворядний підшипник;
C – електромагнітний підшипник; D – сенсор положення ротора;
E – синхронний двигун шпинделя; G – гідравлічний демпфер [25]

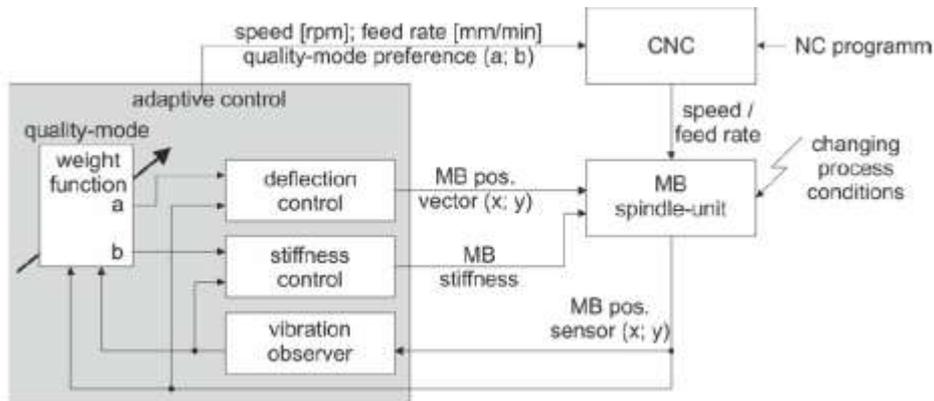


Рисунок 14 – Адаптивна система управління шпинделем із замкненим контуром [25]

3.2. Управління динамічними характеристиками за допомогою п'єзоелектричного приводу. У роботі [26] була запропонована модель передбачуваного управління гасінням вібрацій при фрезеруванні за допомогою п'єзоелектричного приводу. Вібрація шпинделя вимірювалась в двох ортогональних площинах датчиками переміщень. А дві пари п'єзоелектричних приводів встановлені на зовнішньому кільці підшипників (рис. 15). Моделювання процесу фрезерування із запропонованим методом керування показало, що завдяки гасінню вібрацій була підвищена стабільність різання, і максимальна глибина різання без вібрацій буда збільшена з 0,6 мм до 4 мм.

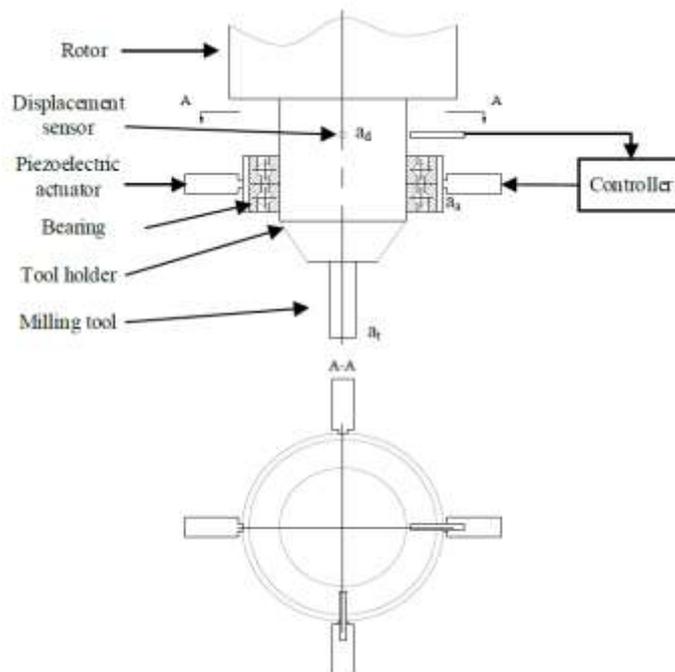


Рисунок 15 – Схема управління гасінням вібрацій за допомогою п'єзоелектричних приводів [26]

У дослідженні [27] було змодельовано роботу шпиндельного вузла фрезерного верстату при швидкості обертання 15000 хв^{-1} та різних глибинах різання для виявлення частот виникнення вібрацій. Для погашення таких вібрацій була запропонована модель адаптивного управління шпиндельним вузлом за допомогою п'єзоелектричних приводів (рис. 16). Процес управління за запропонованим методом був змодельований у середовищі SIMULINK. Результати моделювання показали, що використання замкнутого контуру управління вібраціями значно стабілізують процес різання.

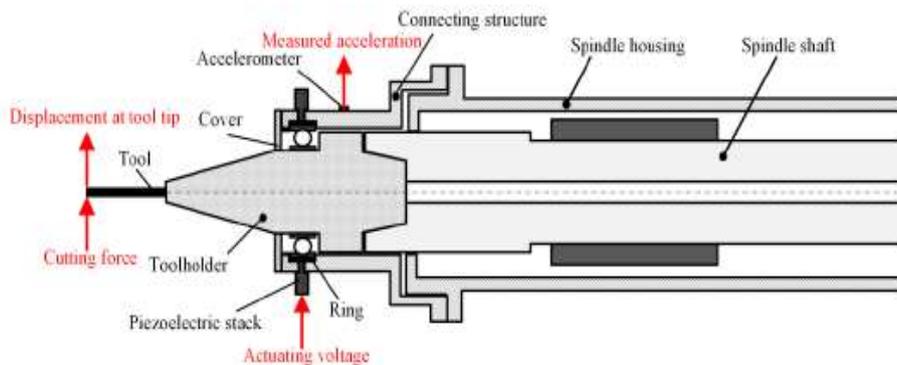


Рисунок 16 – Система активного управління гасінням вібрацій [27]

Дослідження п'єзоелектричних приводів для гасіння вібрацій також було проведено в роботі [28]. Був розроблений новий метод оцінки стабільності процесу фрезерування та проведені дослідження на експериментальному стенді (рис. 17 Рисунок). В алюмінієвій плиті були оброблені два пази глибиною 2 мм при частоті обертання 585 хв^{-1} та подачі 60 мм/хв. Амплітуди коливань для всіх частот вібрацій, а особливо низьких, були значно меншими при застосуванні запропонованого контролера. Наглядний результат видно при порівнянні якості поверхні пазів оброблених з контролером та без.

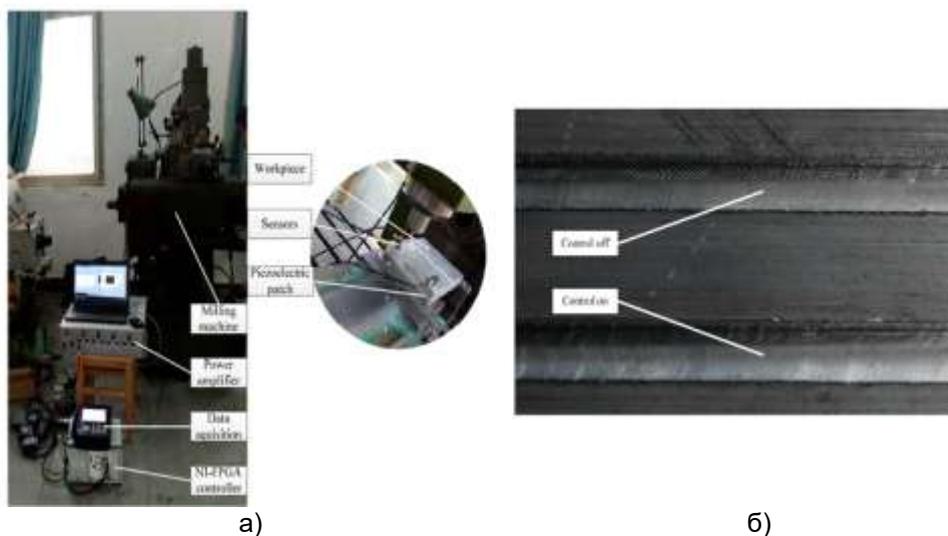


Рисунок 17 – Експериментальний стенд (а) та оброблені зразки (б) [28]

3.3. Управління динамічними характеристиками за допомогою інерційного віброприводу. У роботі [29] розглядалися різні стратегії керування інерційним віброприводом SA10-V30 від CSA Engineering для покращення стабільності процесу обробки (рис. 18): контролер прямого зворотного зв'язку швидкості, метод лінійних квадратичних регуляторів та H_{∞} -контроль. В якості експериментального дослідження проводилося фрезерування пазів шириною 50 мм. Було підтверджено збільшення глибини різання при стабільному процесі фрезерування для всіх трьох стратегій керування в 1,6...2 рази.

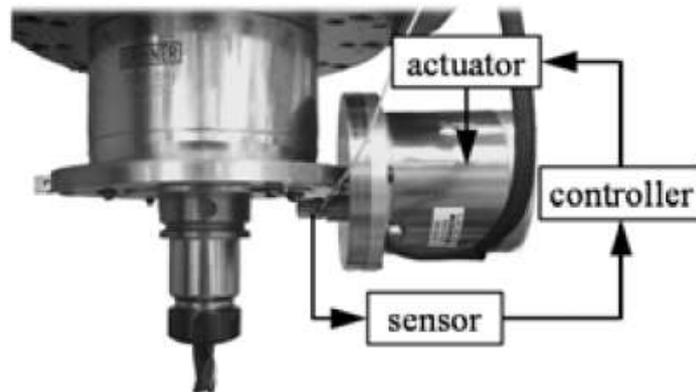


Рисунок 18 – Керування вібраціями шпинделя за допомогою інерційного віброприводу [29]

Авторами дослідження [30] був розроблений власний інерційний вібропривод (рис. 19). Для зменшення вібрацій була обрана стратегія управління зі зворотнім зв'язком по швидкості. Вбудована система складалася з інерційного віброприводу, акселерометра для вимірювання рівня вібрацій, контролера та підсилювача струму. Експериментально підтверджено покращення стабільності процесу фрезерування при використанні розробленого інерційного віброприводу, що дозволило збільшити глибину різання до 2 разів без появи вібрацій.

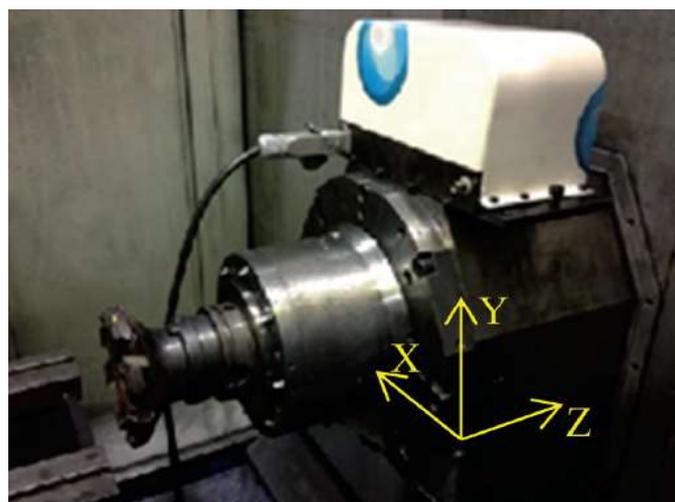


Рисунок 19 - Інерційний вібропривод встановлений на оброблюючому центрі DS-630 [30]

На рисунку 20 видно покращення якості обробленої поверхні за рахунок підвищення стабільності фрезерування при ввімкненні інерційного віброприводу.



Рисунок 1 – Оброблений зразок до ті після ввімкнення інерційного віброприводу [30]

Обговорення результатів. Проаналізовані в даній статті експериментальні дослідження зведено в таблицю 1. Усі методи були розділені на 3 групи в залежності від способу підвищення стабільності процесу різання. Серед запропонованих методів був визначений спосіб експериментальної валідації, а також умови проведення експерименту. Також вказано спосіб побудови діаграми сталості (SLD).

Половина методів досліджується по математичним моделям або на експериментальному обладнанні. Тому попри достатньо велику теоретичну базу актуальним залишається питання практичної перевірки та застосування новітніх методів управління динамічними характеристиками ШВ. Наряду з цим існують досі недостатньо досконально вивчені технологічні процеси, наприклад, обробка нежорстких деталей. При обробці нежорстких деталей виникає необхідність враховувати вплив динамічної взаємодії інструменту та заготовки на стабільність процесу різання.

ВИСНОВКИ

Більшість експериментальних досліджень інтелектуальних систем управління ШВ проводяться на обробляючих центрах, при цьому досліджується в основному процес фрезерування. Це пояснюється широкою універсальністю такого обладнання. Але доцільним є розширення технологічних можливостей верстатів різних груп за рахунок впровадження інтелектуальних систем управління. Це дасть можливість відчутно посприяти підвищенню їх продуктивності при відносно незначних витратах. Дослідження динаміки процесу різання доцільно також з точки зору перевірки рекомендованих виробниками різального інструменту режимів різання, які можуть виявитися не відповідними дійсним умовам обробки. Тому дослідження можливостей інтелектуального управління стабільністю процесу різання може зменшити кількість «білих плям» в наукових знаннях та практичних підходах при проектуванні нових верстатів і вдосконаленні існуючих.

Технологічні комплекси • Technological Complexes
2025
Том 17. № 2 • Vol. 17. No 2

Таблиця 1 – Експериментальні дослідження методів стабілізації процесу різання

№ п/п	Методи підвищення стабільності	Спосіб побудови діаграми сталості (SLD)	Актуатор	Дані експерименту					Посилання
				Заготовка	Режим різання	Верстат	Інструмент	Датчики визначення вібрації	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Варіювання швидкості обертання шпинделя									
1		Напівдискретний метод		AISI 4340	$n=250 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=0,03 \text{ мм}$ $f_o=0,10 \text{ мм/об}$	СК6150А токарний верстат	2NC-DCGW11T304	Динамометр Kistler 9257	[8]
2				Алюміній	$n=600 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=0,2 \text{ мм}$ $f_o=0,10 \text{ мм/об}$	Токарний ЧПК	MDJNR2525M11	GRAS46BE Мікрофон	[9]
2. Оптимізація керуючої системи									
3	Стабілізація регенеруючої вібрації	Дискретний метод побудови			$f_z=0,1 \text{ мм/зуб}$ $t_r=12,7 \text{ мм}$	Моделювання	Ø25,4мм, z=4 зуба		[10]
4	Delayed Acceleration Feedback	Метод частотних інтервалів	Micromega ADD-2D-1 kN electromagnetic actuator	Сталь F1140 (C45) Ø 950 mm	$n = 135 \text{ хв}^{-1}$ $f_o=0,4 \text{ мм/об}$	SORALUCE vertical turning center	C8-PRS CL-55080- 32 RCMX 320900 4225	IMI акселерометр (ICP type)	[11]
5	BPNN PID		MPT-2J PZT	7075-T6	$n=(8-12) \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$ $f=200-600 \text{ мм/хв}$ $t_r=0,2-0,4 \text{ мм}$ $a_p=0,2 \text{ мм}$	Carver S600A milling center	Ø8мм, z=2 зуба	5E101 eddy current displacement sensor	[12]
6	Придушення збурень та стабілізація	ZOA			$n=2300, 2700 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=1,5; 2; 2,5 \text{ мм}$	Моделювання			[13]
7	Компенсація прискорення при змінах швидкості	Напівдискретний метод	Активний магнітний підшипник		$n=(2-8) \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=5 \text{ мм}$	Моделювання	Ø10мм, z=2 зуба		[14]

**Технологічні комплекси • Technological Complexes
2025
Том 17. № 2 • Vol. 17. No 2**

Кінець таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3. Активні методи контролю									
3.1 Магнітний підшипник									
8		Методи частотних інтервалів	Активний електромагнітний підшипник	Сталь, алюміній	$n=(4-5) \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$	Експериментальний стенд		LED-photo detectors	[24]
9		-	ЕСАМА	Акрил, алюміній, мідь	$n=3000 \text{ хв}^{-1}$ $f=300 \text{ мм/хв.}$ $a_p=2,5 \text{ мм}$ $t_f=1 \text{ мм}$	How-Mau CNC Machinery	Ø8мм, z=4 зуба	-	[20]
3.2 П'єзоелектричний актуатор									
10		ZOA, Padé approximation	П'єзоелектричний актуатор	-	$n=8000 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=1 \text{ мм}$ $t_f=5 \text{ мм}$	Моделювання	Ø10мм, z=4 зуба	-	[26]
11		-	П'єзоелектричний актуатор	-	$n=15000 \text{ хв}^{-1}$ $a_p=0,09-0,18 \text{ мм}$	Моделювання Simulink	-	-	[27]
12		-	П'єзоелектричний актуатор (M-8557-P1, M + P)	Алюміній	$n=585 \text{ хв}^{-1}$ $f=60 \text{ мм/хв}$ $a_p=2 \text{ мм}$	Експериментальний стенд		Акселерометр 352C34, PCB, Dewep	[28]
3.3 Інерційний вібропривод									
13			SA10-V30 від CSA Engineering	Сталь С45	$a_p=1,5-2,9 \text{ мм}$	SPINNER U5-620 machining center	торцева фреза Ø 50мм	Акселерометр KS 813B від MMF	[29]
14			Оригінальний інерційний вібропривод	Сталь F1140	$n=610 \text{ хв}^{-1}$ $f_z=0,2 \text{ мм/зуб}$ $t_f=100 \text{ мм}$	DS-630 machining center	SANDVIK R245-125Q40-12M Ø125 mm, z=8 зубів	Акселерометр	[30]

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. Wójcicki, M. Leonesio, and G. Bianchi, "Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 86–91, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.03.015.
- [2] C. YUE, H. GAO, X. LIU, S. Y. LIANG, and L. WANG, "A review of chatter vibration research in milling," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 2, pp. 215–242, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.11.007.
- [3] J. Munoa et al., "Chatter suppression techniques in metal cutting," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, pp. 785–808, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.
- [4] B. Liu, C. Liu, X. Yu, Y. Zhou, and D. Wang, "Prediction, detection, and suppression of regenerative chatter in milling," Oct. 01, 2022, SAGE Publications Inc. doi: 10.1177/16878132221129746.
- [5] Y. Sun, M. Zheng, S. Jiang, D. Zhan, and R. Wang, "A State-of-the-Art Review on Chatter Stability in Machining Thin-Walled Parts," Mar. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/machines11030359.
- [6] G. Quintana and J. Ciurana, "Chatter in machining processes: A review," May 2011. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
- [7] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 104, pp. 333–339, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JBUSRES.2019.07.039.
- [8] L. Ding, Y. Sun, and Z. Xiong, "Active Chatter Suppression in Turning by Simultaneous Adjustment of Amplitude and Frequency of Spindle Speed Variation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 142, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.1115/1.4045618.
- [9] Z. Li, Q. Song, L. Zhanqiang, B. Wang, and Y. Cai, "Chatter suppression mechanism and parameters configuration of the spindle speed variation with piecewise characteristics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 122, Sep. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10071-z.
- [10] X. Long, S. Ren, and P. Zheng, "Delayed State Feedback Control for Milling Process," *Procedia IUTAM*, vol. 22, pp. 115–122, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PIUTAM.2017.08.015.
- [11] I. Mancisidor, A. Pena-Sevillano, Z. Dombovari, R. Barcena, and J. Munoa, "Delayed feedback control for chatter suppression in turning machines," *Mechatronics*, vol. 63, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.mechatronics.2019.102276.
- [12] M. Guo, W. Xia, J. Liu, W. Guo, and C. Wu, "Investigation on active vibration control to improve surface quality in precision milling process," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, 2023, doi: 10.1177/09544054231207422.
- [13] J. Monnin, F. Kuster, and K. Wegener, "Optimal control for chatter mitigation in milling – Part 1: Modeling and control design," *Control Eng Pract*, vol. 24, no. 1, pp. 156–166, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.CONENGPRAC.2013.11.010.
- [14] T. Huang, Z. Chen, H. T. Zhang, and H. Ding, "Active control of an active magnetic bearings supported spindle for chatter suppression in milling process," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, vol. 137, no. 11, Nov. 2015, doi: 10.1115/1.4030841.
- [15] A. Etxebarria, R. Barcena, and I. Mancisidor, "Active Control of Regenerative Chatter in Turning by Compensating the Variable Cutting Force," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224006–224019, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043975.
- [16] J. Bartscher and J. Fleischer, "Adaptive tuned mass damper with variable mass for chatter avoidance," *CIRP Annals*, vol. 66, no. 1, pp. 397–400, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.CIRP.2017.04.059.

- [17] A. Iglesias, Z. Dombovari, G. Gonzalez, J. Munoa, and G. Stepan, "Optimum selection of variable pitch for chatter suppression in face milling operations," *Materials*, vol. 12, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.3390/ma12010112.
- [18] P. Imoberdorf, C. Zwysig, S. D. Round, and J. W. Kolar, "Combined Radial-Axial Magnetic Bearing for a 1 kW, 500,000 rpm Permanent Magnet Machine," in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2007, pp. 1434–1440. doi: 10.1109/APEX.2007.357705.
- [19] N.-C. Tsai and S.-L. Hsu, "On Sandwiched Magnetic Bearing Design," *Electromagnetics*, vol. 27, no. 6, pp. 371–385, Aug. 2007, doi: 10.1080/02726340701492455.
- [20] R. M. Lee and T. C. Chen, "Adaptive control of active magnetic bearing against milling dynamics," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.3390/app6020052.
- [21] N.-C. Tsai and R.-M. Lee, "Regulation of spindle position by magnetic actuator array," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, pp. 93–104, Mar. 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2830-0.
- [22] S. Sheng and C. Sun, "A near-hover adaptive attitude control strategy of a ducted fan micro aerial vehicle with actuator dynamics," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 5, no. 4, pp. 666–681, 2015, doi: 10.3390/app5040666.
- [23] S. Sheng and C. Sun, "Design of a Stability Augmentation System for an Unmanned Helicopter Based on Adaptive Control Techniques," *Applied Sciences*, vol. 5, pp. 575–586, Sep. 2015, doi: 10.3390/app5030575.
- [24] P. Matthias, B. Peter, K. Hans-Joachim, and W. Rafael, "Adaptive Spindle Damping System with Active Electromagnetic Bearing," *Procedia Manuf.*, vol. 8, pp. 557–562, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.071.
- [25] H.-J. Koriath, M. Hoffmann, and P. Blau, "Цифровые технологии Industrie 4.0 для станков и промышленного оборудования," *Avtomatisazija v promyshlennosti 1819-5962*, vol. 5, pp. 9–11, Apr. 2017.
- [26] D. Li, H. Cao, F. Shi, X. Zhang, and X. Chen, "Model Predictive Control Based Chatter Suppression in Milling Process via Piezoelectric Stack Actuators," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 31–36. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.308.
- [27] F. Shi, H. Cao, D. Li, X. Chen, and X. Zhang, "Active chatter control in high speed milling processes based on H_{∞} almost disturbance decoupling problem," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 37–42. doi: 10.1016/j.procir.2018.09.050.
- [28] X. Zhang, C. Wang, R. X. Gao, R. Yan, X. Chen, and S. Wang, "A novel hybrid error criterion-based active control method for on-line milling vibration suppression with piezoelectric actuators and sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.3390/s16010068.
- [29] R. Kleinwort, M. Schweizer, and M. F. Zaeh, "Comparison of Different Control Strategies for Active Damping of Heavy Duty Milling Operations," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 396–399. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.054.
- [30] I. Mancisidor, X. Beudaert, G. Aguirre, R. Barcena, and J. Munoa, "Development of an active damping system for structural chatter suppression in machining centers," *International Journal of Automation Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 642–649, Sep. 2018, doi: 10.20965/ijat.2018.p0642.

CONTROL SYSTEMS FOR THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SPINDLE UNITS: A REVIEW OF PUBLICATIONS

¹ **Ponomarenko, S.** *PhD student*

² **Sapon, S.** *PhD, Associate Professor*

¹ **Chernihiv Polytechnic National University / Ukraine**

² **Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute / Ukraine**

Abstract. The article presents a review of modern methods and systems for active vibration control in machining processes, specifically milling and turning. Two main directions are considered: spindle speed variation and machine tool control system optimization. The application of active control systems, including electromagnetic bearings, piezoelectric actuators, and inertial vibration actuators, for improving the dynamic characteristics of the spindle unit and suppressing self-excited vibrations is analyzed in detail. Examples of experimental studies and mathematical models confirming the effectiveness of various approaches in enhancing cutting process stability, improving machined surface quality, and increasing productivity are provided. Particular attention is paid to the comparative analysis of different control algorithms, such as PID, Fuzzy PID, BPNN, and BPNN PID, as well as disturbance suppression and stabilization methods. The application of active magnetic bearings with various configurations (radial, modified radial, and embedded cylindrical magnetic drives) and adaptive control systems based on them is separately considered. The use of piezoelectric actuators for active vibration damping is analyzed, and the results of modeling and experimental studies are presented. The effectiveness of using inertial vibration actuators with different control strategies to improve milling stability is also discussed. Based on the conducted review, a conclusion is made about the promising nature of active vibration control methods for increasing the efficiency and quality of machining. The importance of further research in the direction of practical implementation and improvement of existing control systems, especially for machining flexible parts where the dynamic interaction of the tool and workpiece plays a significant role, is emphasized.

Keywords: self-excited vibrations, cutting stability, active vibration control, spindle unit, electromagnetic bearing, piezoelectric actuator, inertial vibration actuator.

Дата першого надходження
статті до видання

25.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування

09.10.2025 р.

Дата
оприлюднення

23.12.2025 р.