

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-07>
УДК 621.798:681.5.015.23

¹ Сапон С. П.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1082-6431
² Пономаренко С. В.
Аспірант
ORCID: 0009-0003-3260-6541
³ Яровий Ю. В.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6997-4108

¹ Національний технічний
університет України «Київський
політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» / Україна
² Національний університет
«Чернігівська політехніка» /
Україна
³ Одеський національний
морський університет / Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ. ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Анотація: стаття присвячена огляду сучасних методів прогнозування стабільності процесу різання металів, що є ключовим аспектом для забезпечення якості та ефективності обробки в машинобудуванні. Проведено систематичний аналіз наукових публікацій, присвячених побудові діаграм зон стабільності (Stability Lobe Diagram, SLD), які визначають оптимальні режими різання, що дозволяють уникнути самозбуджуваних вібрацій. У статті розглянуто як теоретичні підходи до побудови SLD, що базуються на математичному моделюванні динаміки процесу різання та розв'язанні диференціальних рівнянь із запізненням, так і експериментальні методи, що використовують дані, отримані безпосередньо під час обробки. Проаналізовано методи частотних інтервалів, дискретні та чисельні методи, а також експериментальні підходи, такі як машинне навчання на основі акустичних сигналів та метод поступового збільшення глибини. Особливу увагу приділено застосуванню SLD для прогнозування стабільності при обробці нежорстких деталей, де динамічна взаємодія інструменту та заготовки є критично важливою. Проведено порівняльний аналіз різних методів побудови SLD, визначено їх переваги та недоліки, а також області застосування. На основі проведеного огляду зроблено висновки про актуальність подальших досліджень у напрямку вдосконалення методів побудови та практичного застосування SLD для оптимізації режимів різання, підвищення продуктивності та якості обробки на металорізальних верстатах різних типів.

Ключові слова: адаптивні системи управління, шпіндельний вузол, діаграма зон стабільності, регенеруюча вібрація, машинне навчання, прогнозування вібрацій.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В сучасних умовах виробництва постійно зростають вимоги до якості та точності оброблених поверхонь деталей, особливо у високоточних галузях машино- та приладобудування. Одним з ключових факторів, що впливають на точність обробки, є стабільність процесу різання. Нестабільність може призводити до виникнення самозбуджуючих вібрацій, погіршення якості поверхні та зниження продуктивності. Для забезпечення стабільної роботи та вибору оптимальних режимів різання широко використовуються діаграми зон стабільності (Stability Lobe Diagram, SLD). Ці діаграми відображають залежність максимально допустимої глибини різання від швидкості обертання шпинделя, визначаючи стабільні та нестабільні області обробки.

Значна кількість сучасних досліджень спрямована на розробку та вдосконалення методів прогнозування стабільності різання та побудови SLD діаграм. Ці дослідження включають як теоретичне моделювання динаміки процесу різання, так і експериментальні підходи для визначення меж стабільності. Розуміння та систематизація існуючих методів прогнозування стабільності процесу різання є важливим для подальшого розвитку інтелектуальних систем управління верстатами та оптимізації процесів обробки. Тому існуючі дослідження потребують систематизації та поглибленого вивчення методів та засобів прогнозування стабільності процесу різання шляхом побудови SLD діаграм.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний момент існують публікації оглядового характеру, що стосуються інтелектуальних (цифрових) систем управління динамічними характеристиками ШВ [3], [4] [5], [6], [7]. У роботі [7] авторів Quintana та ін. систематизовано методи забезпечення стабільності процесу різання у 2 групи: вибір комбінацій параметрів різання в стабільній зоні SLD та уникання вібрації шляхом зміни поведінки системи та розширення зон стабільності. Але всі приклади в даній роботі обмежені 2011 роком. Yue та ін. проаналізував [3] сучасний стан в передбаченні стабільності фрезерування та методи управління динамічними характеристикам ШВ фрезерних верстатів. Munoa та ін. в своєму огляді [4] не обмежилися фрезеруванням, але більшість проаналізованих методів не можна віднести до категорії інтелектуальних. Liu та інші також проаналізували [5] методи передбачення та управління динамічними характеристиками ШВ при фрезеруванні. Але для передбачення були розглянуті лише математичні моделі та симулювання процесу різання. Натомість експериментальні методи, які враховують безпосередньо всі можливі фактори впливу та процес різання, розглянуті не були. У своєму огляді [6] 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.

Для створення даної статті була застосована методологія систематичного літературного огляду [8], яка основана на виборі стратегії пошуку, фільтруванні, аналізі та систематизації знайдених публікацій.

Був використаний пошук за ключовими словами для попереднього відбору потенційно актуальних наукових публікацій не старіше 2015 року. Пошук публікацій виконувався по наступним науковим базам: Google Scholar, MDPI, Scopus та Science Direct. Статті відбиралися по ключовим словам інтелектуальний/розумний шпindel та управління вібраціями. Найбільш відповідні пошуковому запиту роботи відбиралися по назві та анотації. Результати аналізу за ключовими словами представлені на рисунках 1-3. Як видно з графіка на рисунку 2, кількість досліджень шпинделів з інтелектуальними функціями має стале зростання, що беззаперечно свідчить про актуальність цієї тематики. Найбільше досліджень на цю тему виявлено в Китаї (рис. 3).

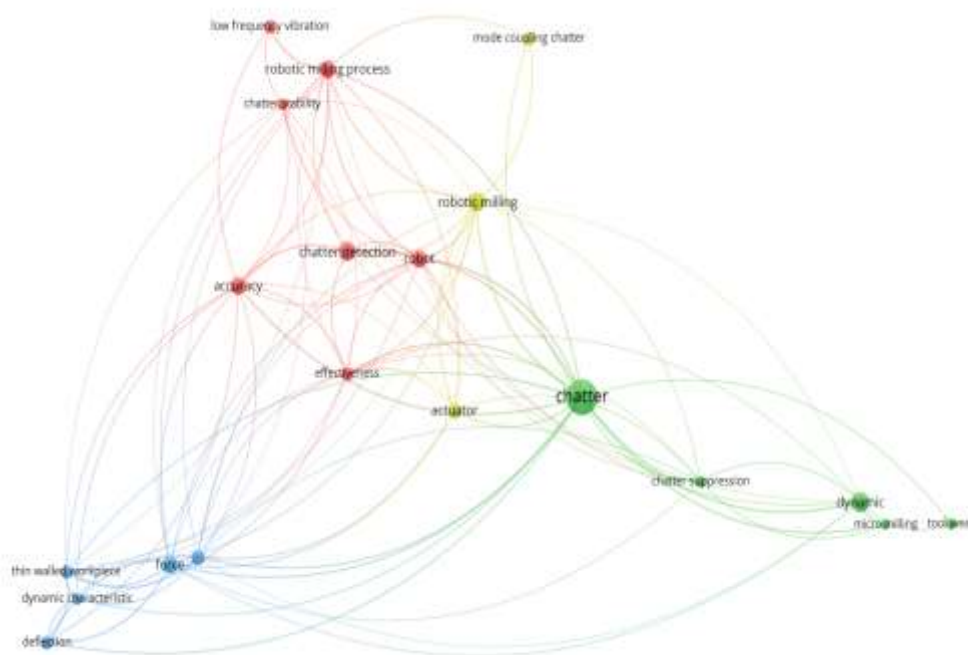


Рисунок 1 – Результати аналізу пошуку статей за ключовими словами Stability Lobe Diagram та регенеруюча вібрація

Для даного огляду були обрані статті, що стосуються побудови Stability Lobe Diagram (SLD) діаграм для визначення зон стабільного різання. Знайдені за пошуковим запитом статті розподілені по досліджуванім в них методам побудови SLD. Показані способи побудови діаграм стабільності та дана узагальнююча оцінка.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

При аналізі знайдених публікацій по побудові діаграм стабільності всі методи були розділені на теоретичні та експериментальні. В даній статті розглянуто підходи до побудови SLD. Необхідно дати оцінку приведених

досліджень та визначити подальші перспективи та проблемні моменти в розвитку способів побудови діаграм стабільності.

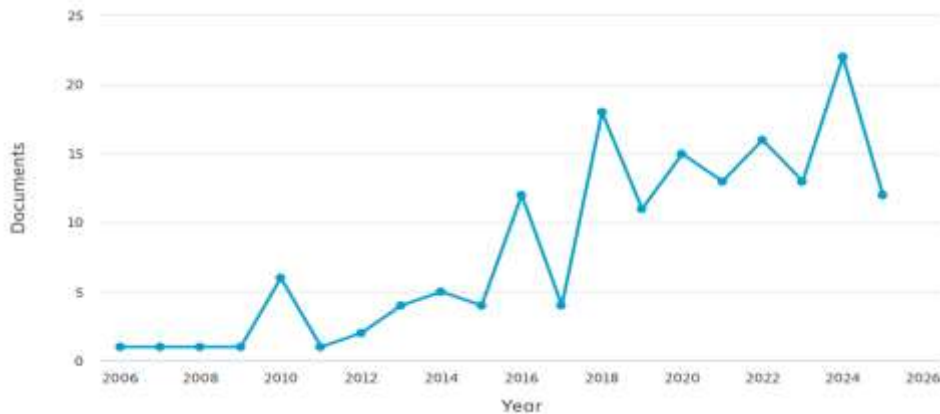


Рисунок 2 – Кількість публікацій за запитом Stability Lobe Diagram та регенеруюча вібрація по роках

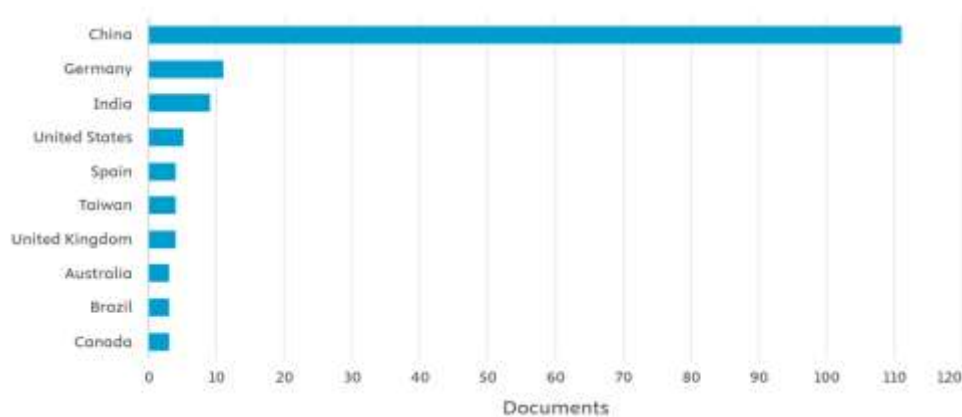


Рисунок 3 – Кількість публікацій по країнах за запитом Stability Lobe Diagram та регенеруюча вібрація

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1 Прогнозування стабільності процесу різання

Динамічні характеристики ШВ визначають стабільність процесу різання при різних режимах роботи. Побудова діаграми стабільності SLD, яка визначає максимальну глибину різання при визначеній швидкості обертання, якнайкраще підходить для опису стабільності процесу різання. Перевищення максимальної глибини різання призводить до появи самозбурюючих вібрацій, тобто до виходу системи із стабільного стану.

Через недостатню динамічну жорсткість одного або декількох елементів технологічної обробляючої системи в процесі різання виникають три типи механічних вібрацій [1]: вільні вібрації, вимушені вібрації та самозбуджуючі

вібрації. Вільні вібрації спричинені ударом, вимушені вібрації спричинені розбалансуванням у шпинделях. Після виявлення причин цих двох типів вібрацій відносно просто уникнути, зменшити або усунути їх. Самозбуджуюча вібрація – це незатухаюча вібрація, що викликана змінною силою, яка виникає внаслідок взаємодії між інструментом і заготовкою. Цей тип вібрації збільшує нестабільність та неконтрольованість системи. В залежності від специфіки механізму самозбудження вібрації можна розділити на три групи [1]: фрикційна вібрація, вібрація внаслідок накладання власних частот (mode coupling chatter) та регенеруюча вібрація. Вібрації перших двох груп можна подолати за рахунок використання експериментального моделювання та аналізу. Регенеруюча вібрація спричинена різницею товщини стружки, що виникає внаслідок різниці фаз між формою поверхні після попереднього проходу інструменту та її зміщенням на наступному проході (рис. 4). Взаємодія ріжучої кромки з хвилястою поверхнею від попереднього проходу може значно збільшити вібрації, що призведе до експоненціального збільшення товщини стружки, таким чином ведучи до значно більших сил і вібрацій, доки ріжучий інструмент не вийде з контакту із заготовкою.

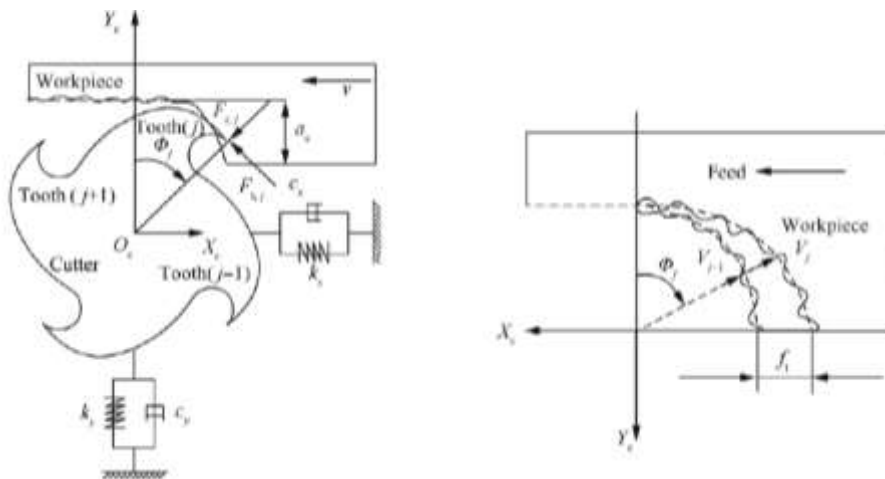


Рисунок 4 – Динамічна модель процесу фрезерування [3]

На даний момент найбільш популярним методом передбачення вібрації є побудова діаграм зон стабільності (SLD) шляхом розв'язання диференціальних рівнянь запізнення по часу процесу різання [3]. Оператор може обрати прийнятні глибину різання та швидкість обертання шпинделя в SLD щоб збільшити стабільність процесу різання.

2 Теоретичні методи побудови SLD

Регенеруюча вібрація зазвичай не виникає на низьких обертах шпинделя через демпфування, але при збільшенні швидкості обертання ефект демпфування знижується [1]. Таким чином оптимізація швидкості зняття матеріалу викликає необхідність вивчення SLD. Для побудови SLD використовується математична модель з чотирма вхідними показниками: коефіцієнти різання, динамічні параметри системи, параметри процесу

різання та геометрія інструменту. Процес різання може бути оптимізований, як зображено на рисунку 5, де M , C , K , $K_c(t)$, $\dot{q}(t)$, $\ddot{q}(t)$, $q(t)$, $[q(t) - q(t-T)]$ є відповідно маса, демпфування, жорсткість, коефіцієнт сили різання, прискорення, швидкість, зміщення, динамічне зміщення ріжучої системи; a_r , Z , D – глибина різання, кількість зубів інструменту та діаметр інструменту; a_{cr} , b , p – гранична глибина різання, радіальна ширина різання та швидкість обертання шпинделя.

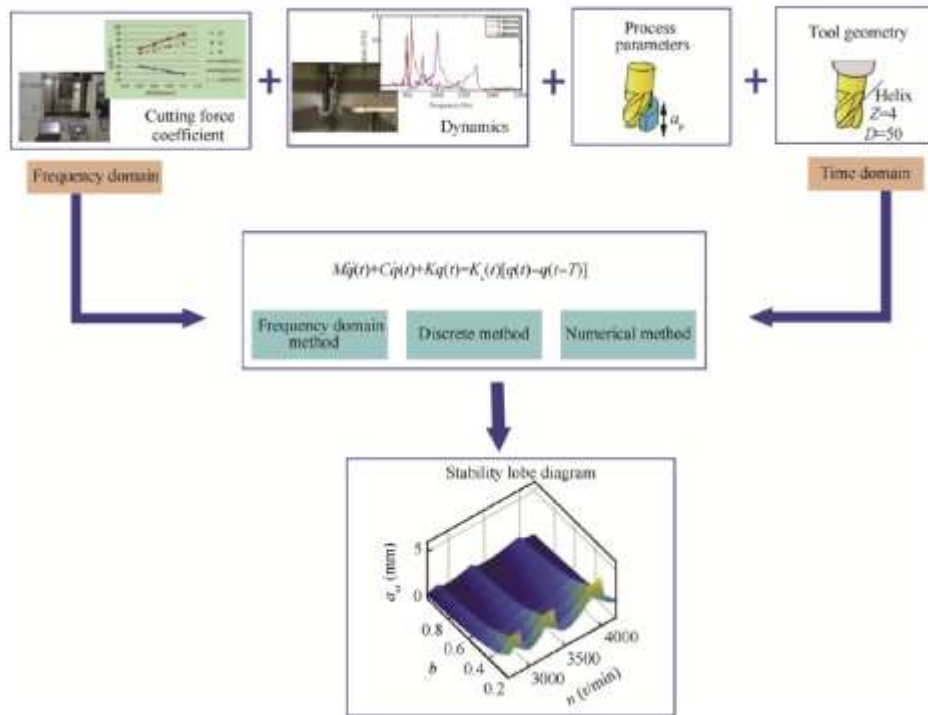


Рисунок 5 – Процес побудови SLD [1]

Коефіцієнти різання представляють межу текучості матеріалу, тертя між інструментом та заготовкою та геометрію інструмента. Для визначення коефіцієнтів різання існують два підходи: приведення коефіцієнтів ортогонального різання до геометрії заданого інструменту [7] та проведення тестової обробки заданим інструментом з вимірюванням сили різання [8].

Динамічні параметри обробляючої системи визначаються експериментально способом ударних тестів або іншими доступними експериментами [2]. Метою цих експериментів є знаходження відносних вібрацій в зоні контакту інструменту із заготовкою, які спричинені власними критичними частотами обробляючої системи, що обмежують продуктивність. У залежності від характеристик процесу різання динамічні параметри можуть змінюватися, тому може знадобитися визначення декількох амплітудно-частотних характеристик в зоні контакту інструменту із заготовкою. У випадку обробки нежорстких заготовок динамічні характеристики також можуть

змінюватися при знятті матеріалу. Цей ефект ускладнює визначення динамічних параметрів [9]. Тому при побудові SLD для процесу обробки тонкостінних або нежорстких заготовок необхідно враховувати податливість заготовки під дією сил різання. Це питання було розглянуто в роботах Данильченка та ін. [10] і Sun та ін. [11]. Вплив жорсткості заготовки на стабільність різання при точінні розглянутий в роботі Gábor та ін. [12]. На рисунку 6 показані межі стабільного різання при товщині стружки 1,75 мм для діаметру заготовки 16 мм (а) та залежність стабільності різання від діаметру заготовки (б). Також методика визначення оптимальних режимів різання при обробці тонких лопатей була запропонована Petráček та ін. [13]. Її суть полягала у розбитті по висоті оброблюваної поверхні на ділянки та розрахунку інтервалів швидкості обертання при стабільному різанні для визначених ділянок. Таким чином були визначені швидкості обертання для кожної ділянки, що було занесено в програму обробки. Для врахування жорсткості заготовки дуже зручно користуватися 3D-SLD графіками, хоча побудова таких графіків, зображених на рисунку 7 є достатньо трудомісткою.

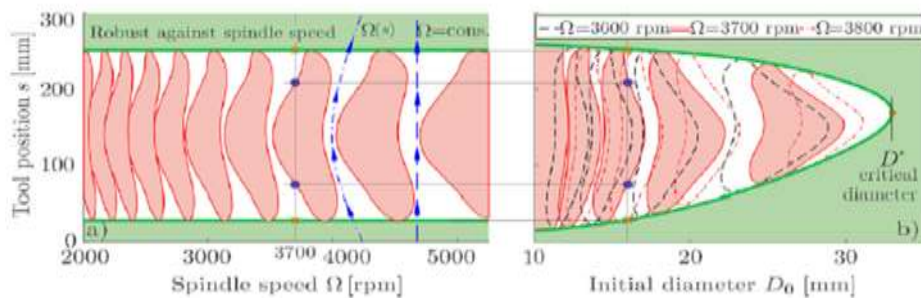


Рисунок 6 – Межі стабільності при точінні нежорсткої заготовки [14]

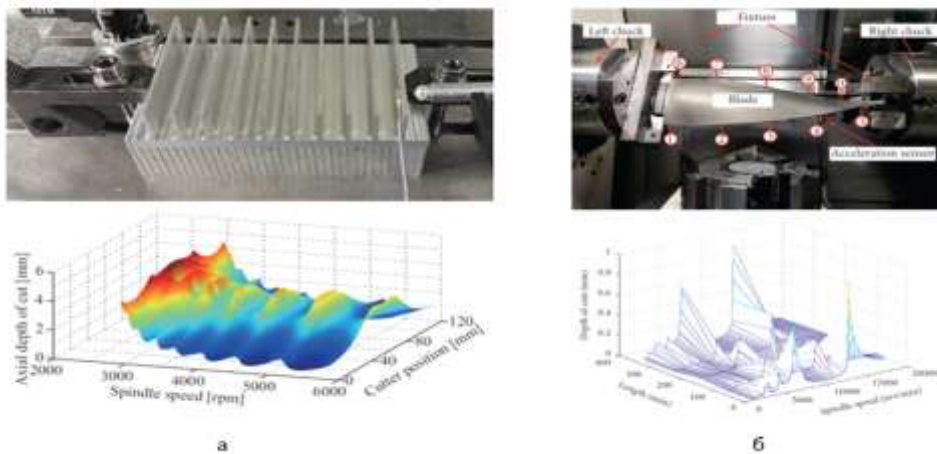


Рисунок 7 – Приклади 3D-діаграм стабільності при обробці тонкостінної заготовки (а) [14]; при обробці лопаті (б) [15]

Параметри процесу різання, такі як врізання інструменту в заготовку, необхідні для моделі стабільності. При складній обробці врізання може постійно змінюватися, тому розрахунки стабільності вимагають тісного зв'язку з САМ системою для створення віртуального середовища обробки, де різні врізання для різних інструментів, операцій та траєкторій можуть бути перенесені в модель стабільності [2]. У деяких випадках інші параметри різання, наприклад, напрям різання, величина подачі також необхідно враховувати для прогнозування стабільності [16]. Це особливо важливо для зубчастих ріжучих кромок або коли розглядаються моделі нелінійних сил [17].

Математична модель стабільності враховує також геометрію інструмента, що впливає на коефіцієнт сили різання, кінематику різання і коефіцієнти напрямку динамічної сили. Такі процеси металообробки як точіння, фрезерування та свердління виконуються інструментами з широким варіюванням допустимої геометрії. Була запропонована уніфікована методологія [18], що базується на основі дискретизації інструменту в нескінченно малих перерізах та застосування перетворення ортогональних параметрів в кутові на кожному перерізі. Такі методи дозволяють будувати SLD для складних інструментів.

Математично динаміка різання для регенеративних ефектів задається диференціальним рівнянням затримки (DDE) з постійними параметрами (точіння) або періодичними в часі параметрами (фрезерування) [1]. Таким чином, метод затримки часу може бути використаний для вирішення DDE та отримання межі стабільності для різання. За цим методом визначаються критичні параметри обробки, щоб область різання можна було розділити на стабільну та нестабільну зони. Потім в стабільній зоні обираються найбільш придатні параметри різання. Таким чином можна уникнути вібрації, посприяти підвищенню ефективності обробки та досягти кращої якості обробки. Методи частотних інтервалів, дискретні методи та чисельні методи є загальними підходами для побудови SLD.

Методи частотних інтервалів зазвичай використовуються для вираження DDE вібраційних моделей в частотній зоні через перетворення Фур'є. І межа стабільності фрезерування визначається теоретично. Метод частотної області нульового порядку ZOA був запропонований Алтінтасом і Будаком [19]. Цей метод є найбільш розповсюдженим для пошуку межі вібраційної стабільності. Однак цей метод не в змозі передбачити додаткову стабільну область при малому радіальному врізанні. Оскільки співвідношення ширини різання/діаметра інструменту зменшується, виникає значне відхилення в прогнозі локальної стабільності [20]. Для вирішення даної проблеми був запропонований [21] та удосконалений [22] багаточастотний метод, який враховує вищі гармоніки динамічної системи.

Моделі регенеративної вібрації, як правило, є системою DDE. Стабільність визначається власним вектором однозначного системного оператора, але однозначний оператор представлений матрицею нескінченної розмірності, що ускладнює розв'язання результатів прогнозування стійкості в закритій формі [1]. У дискретних методах зазвичай використовується скінченновимірна матриця перетворення для апроксимації однозначного оператора

нескінченної розмірності, таким чином зменшуючи складність розв'язання та час обчислення. Основними видами дискретних методів є: напівдискретний метод [23], [24], повністю дискретний метод [25], [26] і метод часових скінчених елементів [27], [28].

Чисельні методи зазвичай напряду розв'язують диференціальне рівняння затримки та отримують динамічний відгук для процесу фрезерування [1]. Після цього стабільність процесу фрезерування можна оцінити за допомогою критеріїв стабільності, побудованих відповідно до відгуку або того, чи є амплітуда вібрації відгуку розбіжною. Qu та ін. [29] використовували статистичну дисперсію динамічного зміщення як критерій виявлення вібрації для отримання SLD процесу різання. Zhang та ін. [30] запропонували чисельний диференціальний метод, заснований на методах кінцевої різниці і екстраполяції, щоб визначити стабільність високошвидкісного фрезерування. Чисельний метод екстраполяції можна неодноразово використовувати для отримання прогнозів стабільності з різним порядком точності.

У роботі [31] було запропоновано моделювання процесу різання в частотній та часовій області за критерієм сталості, що ґрунтується на аналізі частотних характеристик у вигляді діаграми Найквіста, по якому побудовано діаграму стабільності процесу різання. Алгоритм побудови SLD показано на рисунку 8.

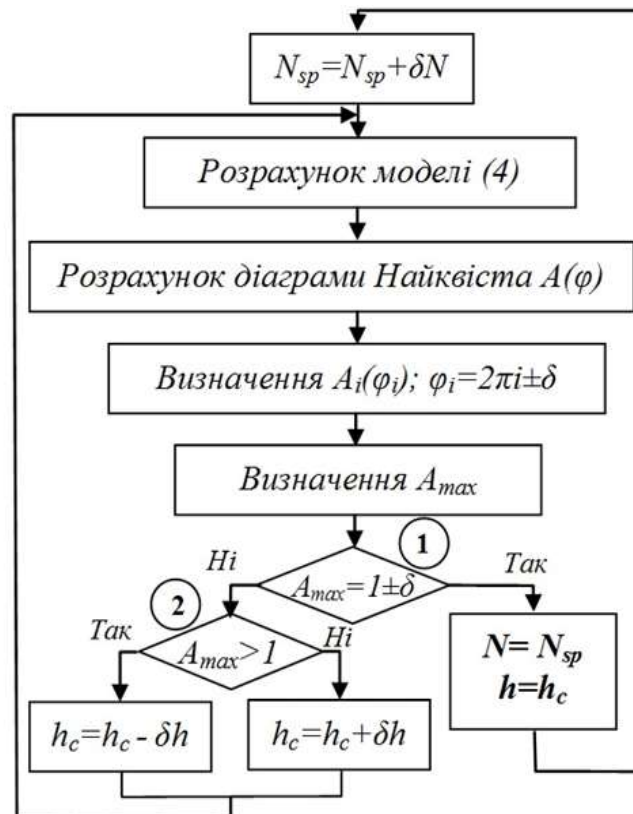


Рисунок 8 – Алгоритм розрахунку діаграми сталості [31]

Також були проведені експериментальні дослідження, які підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та алгоритму (рис. 9 **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**). Даний підхід вибору режимів є досить перспективним для використання в інтелектуальній системі управління шпинделем, адже характеристики роботи шпинделя змінюються в часі, а маючи надійний критерій стабільності можна вчасно регулювати динаміку ШВ для забезпечення стабільності різання без зниження продуктивності.



Рисунок 9 – Поверхні деталі, оброблені при: а – розрахованому несталому режимі; б – розрахованому сталому режимі [31]

3 Експериментальні методи побудови SLD

Окрім теоретичних методів побудови SLD діаграм були запропоновані методи побудови, основані на експериментальних даних. У роботі [32] запропоновано визначати режими різання для стабільного фрезерування по методу машинного навчання по фізичній моделі. Навчання проходило на основі отриманих акустичних сигналів. Машинне навчання було спрямоване на визначення оптимальної швидкості обертання шпинделя, яка б забезпечувала стабільність роботи при максимальній глибині різання. На основі експериментів з обробки алюмінію була побудована діаграма стабільної роботи в залежності від глибини різання та частоти обертання шпинделя (рис. 10). Виявлено, що рекомендовані виробником режими різання знаходяться за межами стабільної роботи кінцевої фрези.

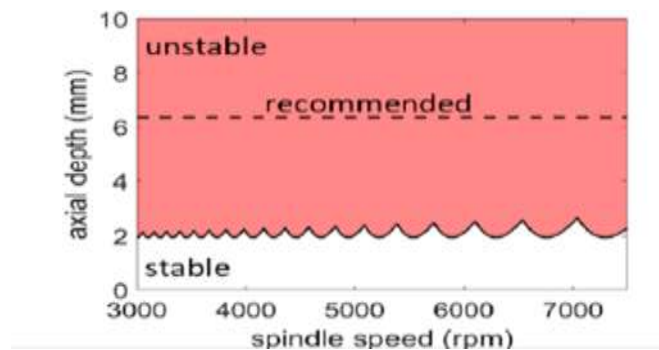


Рисунок 10 – Розрахована за допомогою машинного навчання та рекомендована виробником глибина різання для роботи в стабільному режимі [32]

Brecher та ін. у роботі [33] запропонував швидкий метод експериментального визначення межі стабільного різання. Суть методу полягала у визначенні початку вібрації акселерометром при фрезеруванні пазу з постійним збільшенням глибини різання при різних частотах обертання шпинделя. Такий підхід дозволив зменшити кількість дослідів, а також врахувати всі стохастичні збурення системи, які не можливо повністю описати в математичній моделі.

Для більш точної побудови SLD діаграм Akbari та ін. запропонував [34] визначати динамічні характеристики оброблюючої системи безпосередньо під час обробки. Запропонований спосіб базувався на контактному зв'язку підконструкцій або RCSA, що дозволило виділити підконструкції верстат–шпиндель і тримач–інструмент у пов'язану систему обробки. Таким чином динамічні характеристики процесу різання можна визначити за допомогою датчика, виведеного із зони різання. Отримані сигнали обробляються з урахуванням матриць переходу між визначеними підконструкціями. Методи побудови SLD діаграм зведені до таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація методів побудови SLD

Метод	Спосіб визначення стабільності	Посилання
Теоретичні методи		
Методи частотних інтервалів	Метод частотної області нульового порядку Багаточастотний метод	[19] [20] [21] [22]
Дискретні методи	Напівдискретний метод Повністю дискретний метод Метод часових скінчених елементів	[23] [24] [25] [26] [27],[28]
Чисельні методи	Статистична дисперсія динамічного зміщення Чисельний метод екстраполяції	[29] [30]
Експериментальні методи		
Метод машинного навчання по фізичній моделі	Акустичні сигнали	[32]
Метод поступового збільшення глибини різання	Акселерометр	[33]
Метод контактного зв'язку підконструкцій або RCSA	Датчик зміщень та акселерометр	[34]

Обрані для даної статті дослідження були зведені в таблицю 2. Серед запропонованих способів побудови SLD був визначений спосіб експериментальної валідації, а також умови проведення експерименту.

ВИСНОВКИ

Більшість методів побудови SLD та експериментальних досліджень виконано на оброблюючих центрах, при цьому досліджується в основному процес фрезерування, що пояснюється його широкою універсальністю з точки

1 Таблиця 2 – Експериментальне дослідження методів підвищення стабільності

№ з/п	Методи підвищення стабільності	Спосіб побудови SLD	Дані експерименту					Посилання
			Заготовка	Режим різання	Верстат	Інструмент	Датчики визначення вібрації	
1	Машинне навчання по фізичній моделі (PGML)	Monte Carlo	6061-T6	6264-24828 хв ⁻¹ t=2,3-5мм, 0,102мм/зуб	Haas VF-4 three-axis milling machine	Ø12,7мм, 3 зуба	Shure SM94 мікрофон	[32]
2	По даним експерименту	Poincaré-section based time domain method	Сталь C45	0,01 мм/зуб; (2-4)·10 ³ хв ⁻¹	Двохшпindelний оброблюючий центр	Ø16мм, 4 зуба	Акселерометр	[33]
3	По даним експерименту	ZOA	Алюміній 6082	0,1мм/зуб t=0,4мм (8-20)·10 ³ хв ⁻¹	GF Mikron HPM 800U 5-axis milling machine	Ø12мм, 4 зуба	NCDT 3010-U05-M-C3 безконтактний емнісний сенсор	[34]
4	По даним експерименту	ZOA	Сталь Fe37B1FN	600 хв ⁻¹ ; 34 мм/хв; t = 0.1-0.3мм	Експериментальний стенд	Ø16мм, 2 зуба	Акселерометр PCB 353B15	[10]
5	По даним експерименту	Напівдискретний метод	Алюміній 6061-T6	t _r =0.2мм; 4000-7000хв ⁻¹	5-координатний оброблюючий центр	Ø16мм, 1 зуб	Мікрофон GRAS 46AE Динамометр KISTLER 9257B	[11]
6	По даним експерименту	Метод скінчених елементів	34CrNiMo6 Ø42мм	3500 хв ⁻¹ t= 0.2мм	Doosan Puma 2500Y CNC	Sandvic SNMM 12 04 12-PR 4215 вставка	PCB Piezotronic 353B03; Мікрофон Shure Prologue 14 L	[12]
7	По даним експерименту	Метод скінчених елементів	Алюміній 7075	(12-13)·10 ³ хв ⁻¹ t=0.15-0.9мм; 2032 мм/хв	MCU700 5AX five-axis milling machine	Ø10мм ISCAR MM EB100A07-4T06	Keyence VHX-7000 with Dual Objective Zoom Lens VH-ZST	[13]
8	По даним експерименту для тонкостінних деталей	Метод скінчених елементів	Алюміній 7050	t _r =5% 0.05 мм/зуб 3200-5500хв ⁻¹	Експериментальний стенд	Ø12мм, 4 зуба	Динамометр KISTLER TM 9255B; датчик переміщень Мікрофон	[14]
9	По даним експерименту	Напів-дискретний метод	Титановий слав	t _r =0,2 мм, 500 мм/хв; t=0,03-0,6мм; 2500-6000хв ⁻¹	Mazak 200 IV ST токарний оброблюючий центр	Ø10мм, 2 зуба	Акселерометр PCB 356A32	[15]

зору обробки поверхонь різноманітної геометрії. Втім, автори вважають доцільним розширення діапазону дослідження способів побудови діаграм стабільності на верстатах інших груп. Це може дати можливість відчутно посприяти підвищенню ефективності виробничого підприємства в цілому при відносно незначних витратах. Попри достатньо велику теоретичну базу актуальним залишається питання практичної перевірки адекватності новітніх методів побудови та застосування діаграм стабільності. Наряду з цим існують досі недостатньо вивчені технологічні процеси, наприклад, обробка нежорстких деталей, коли обов'язково необхідно враховувати вплив динамічної взаємодії інструменту та заготовки на стабільність процесу різання.

Тому подальші дослідження цікавими та найбільш актуальними будуть у напрямку вдосконалення методів побудови та практичного застосування SLD для оптимізації режимів різання, підвищення продуктивності та якості обробки на металорізальних верстатах не фрезерувальної групи.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] G. Quintana and J. Ciurana, "Chatter in machining processes: A review," May 2011. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
- [6] 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.
- [7] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511843723.
- [8] Z. Q. Yao, X. G. Liang, L. Luo, and J. Hu, "A chatter free calibration method for determining cutter runout and cutting force coefficients in ball-end milling," *J Mater Process Technol*, vol. 213, no. 9, pp. 1575–1587, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2013.03.023.
- [9] E. Budak, L. T. Tunç, S. Alan, and H. N. Özgüven, "Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling," *CIRP Annals*, vol. 61, no. 1, pp. 339–342, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.CIRP.2012.03.144.
- [10] Y. Danylchenko et al., "Dynamic characteristics of 'tool-workpiece' elastic system in the low stiffness parts milling process," in *Mechatronic Systems 2*, Routledge, 2021, pp. 225–236. doi: 10.1201/9781003225447-20.

- [11] Y. Sun and S. Jiang, "Predictive modeling of chatter stability considering force-induced deformation effect in milling thin-walled parts," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 135, pp. 38–52, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2018.08.003.
- [12] G. Stepan, A. K. Kiss, B. Ghalamchi, J. Sopanen, and D. Bachrathy, "Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 1, pp. 377–380, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.054.
- [13] P. Petráček, J. Falta, M. Stejskal, A. Šimůnek, P. Kupka, and M. Sulitka, "Chatter-free milling strategy of a slender Blisk blade via stock distribution optimization and continuous spindle speed change," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 3–4, pp. 1273–1295, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10264-6.
- [14] J. Feng, M. Wan, T.-Q. Gao, and W.-H. Zhang, "Mechanism of process damping in milling of thin-walled workpiece," 2018.
- [15] Z. Zhao, J. Hou, and Y. Fu, "Measurement-Based Modal Analysis and Stability Prediction on Turn-Milling of Hollow Turbine Blade," *Shock and Vibration*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8861373.
- [16] Z. Dombovari, Y. Altintas, and G. Stepan, "The effect of serration on mechanics and stability of milling cutters," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 50, no. 6, pp. 511–520, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2010.03.006.
- [17] R. G. Landers and A. G. Ulsoy, "Nonlinear Feed Effect in Machining Chatter Analysis," *J Manuf Sci Eng*, vol. 130, no. 1, Feb. 2008, doi: 10.1115/1.2783276.
- [18] Y. Altintas and Z. M. Kilic, "Generalized dynamic model of metal cutting operations," *CIRP Annals*, vol. 62, no. 1, pp. 47–50, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.CIRP.2013.03.034.
- [19] Y. Altıntaş and E. Budak, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling," *CIRP Annals*, vol. 44, no. 1, pp. 357–362, Jan. 1995, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
- [20] J. Gradišek et al., "On stability prediction for low radial immersion milling," *Machine Science and Technology*, vol. 9, pp. 117–130, Mar. 2005, doi: 10.1081/MST-200051378.
- [21] S. D. Merdol and Y. Altintas, "Multi Frequency Solution of Chatter Stability for Low Immersion Milling," *J Manuf Sci Eng*, vol. 126, no. 3, pp. 459–466, Sep. 2004, doi: 10.1115/1.1765139.
- [22] M. Pour and M. A. Torabizadeh, "Improved prediction of stability lobes in milling process using time series analysis," *J Intell Manuf*, vol. 27, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10845-014-0904-9.
- [23] X. Dong, W. Zhang, and S. Deng, "The reconstruction of a semi-discretization method for milling stability prediction based on Shannon standard orthogonal basis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, no. 5, pp. 1501–1511, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7719-5.
- [24] W. Zhang, Y.-C. Ma, W.-H. Zhang, and Y. Yang, "Study on the construction mechanism of stability lobes in milling process with multiple modes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, Jul. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6829-4.

- [25] X. Tang, F. Peng, R. Yan, Y. Gong, Y. Li, and L. Jiang, "Accurate and efficient prediction of milling stability with updated full-discretization method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 9, pp. 2357–2368, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8923-7.
- [26] Z. Li, Z. Yang, Y. Peng, F. Zhu, and X. Ming, "Prediction of chatter stability for milling process using Runge-Kutta-based complete discretization method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 1, pp. 943–952, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8207-7.
- [27] B. Mann and B. Patel, "Stability of Delay Equations Written as State Space Models," *Journal of Vibration and Control - J VIB CONTROL*, vol. 16, pp. 1067–1085, Jul. 2010, doi: 10.1177/1077546309341111.
- [28] N. K. Garg, B. P. Mann, N. H. Kim, and M. H. Kurdi, "Stability of a Time-Delayed System With Parametric Excitation," *J Dyn Syst Meas Control*, vol. 129, no. 2, pp. 125–135, May 2006, doi: 10.1115/1.2432357.
- [29] S. Qu, J. Zhao, and T. Wang, "Three-dimensional stability prediction and chatter analysis in milling of thin-walled plate," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 5, pp. 2291–2300, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8357-2.
- [30] X. Zhang, C. Xiong, Y. Ding, and H. Ding, "Prediction of chatter stability in high speed milling using the numerical differentiation method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 9, pp. 2535–2544, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8708-z.
- [31] Y. Petrakov and M. Danylchenko, "A time-frequency approach to ensuring stability of machining by turning," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, pp. 85–92, Dec. 2022, doi: 10.15587/1729-4061.2022.268637.
- [32] G. Corson, J. Karandikar, and T. Schmitz, "INTEGRAL BLADE ROTOR MILLING IMPROVEMENT BY PHYSICS-GUIDED MACHINE LEARNING," United States, 2021. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1836426>
- [33] C. Brecher, P. Chavan, and A. Eppele, "Investigations on the limitations of rapid experimental determination of stability boundaries during milling," *Mechanics & Industry*, vol. 18, p. 608, Jan. 2017, doi: 10.1051/meca/2017037.
- [34] V. Ostad Ali Akbari, Y. Mohammadi, M. Kuffa, and K. Wegener, "Identification of in-process machine tool dynamics using forced vibrations in milling process," *Int J Mech Sci*, vol. 239, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107887.

PREDICTION OF CUTTING PROCESS STABILITY: A REVIEW OF PUBLICATIONS

¹ **Sapon S.** PhD, Associate Professor

² **Ponomarenko S.** PhD student

³ **Yarovyi Y.** PhD, Associate Professor

¹ **Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute / Ukraine**

² *Chernihiv Polytechnic National University / Ukraine*

³ *Odesa National Maritime University / Ukraine*

Abstract. This article reviews modern methods for predicting the stability of metal cutting processes, a crucial aspect for ensuring the quality and efficiency of machining in mechanical engineering. The authors conduct a systematic analysis of scientific publications dedicated to the construction of Stability Lobe Diagrams (SLD), which define optimal cutting regimes to avoid chatter. The paper considers both theoretical approaches to SLD construction, based on the mathematical modeling of cutting dynamics and the solution of delay differential equations, and experimental methods that utilize data obtained directly during machining. Frequency domain methods, discrete methods, and numerical methods are analyzed, along with experimental approaches such as machine learning based on acoustic signals and the step-by-step increase of cutting depth method. Particular attention is paid to the application of SLD for predicting stability when machining flexible workpieces, where the dynamic interaction between the tool and the workpiece is critically important. A comparative analysis of different SLD construction methods is carried out, identifying their advantages and disadvantages, as well as their areas of application. Based on the review, conclusions are drawn about the relevance of further research in the direction of improving the methods of constructing and practically applying SLDs for optimizing cutting regimes, increasing productivity, and enhancing the quality of machining on various types of machine tools.

Keywords: intelligent control systems, spindle unit, stability lobe diagram, chatter, machine learning, vibration prediction.