

УДК 621.941. 9.06-529

Забезпечення сталості процесу різання при обробленні деталей на верстатах з ЧПУ

Ю.В. Петраков

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

***Анотація.** Процес різання відбувається в замкненій пружній обробній системі і завжди супроводжується вібраціями, які стають основним обмеженням продуктивності процесу виготовлення деталей. Пропонується забезпечення сталості процесу різання призначенням режиму за діаграмою стабільності (Stability Lobes Diagram – SLD). Розроблений алгоритм автоматичної побудови такої діаграми за новим критерієм сталості для замкнених систем з функцією запізнення в зворотному зв'язку. Представлені результати моделювання процесів токарного оброблення і фрезерування із застосуванням нового критерію сталості. Такі результати повністю підтверджені експериментальними дослідженнями з використанням механізмів експериментального модального аналізу динамічних систем. В результаті розроблена прикладна програма автоматичного визначення SLD при обробленні різанням.*

***Ключові слова:** Сталість процесу різання, діаграма сталості, моделювання.*

Процес різання відбувається в замкненій пружній обробній системі і завжди супроводжується вібраціями. В залежності від амплітуди таких коливань погіршується шорсткість, точність оброблюваної поверхні, відбувається передчасне зношування інструменту, навіть його злам. Отже, вібрації при різанні стають основним обмеженням продуктивності процесу виготовлення деталей. Тому забезпечення сталості різання є надзвичайно актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволить значно підвищити ефективність будь-якого процесу оброблення деталей різанням.

Наразі використовуються в основному три методи гасіння коливань, або зменшення їх амплітуди. По-перше, це пасивні методи управління (Passive Chatter Control), які полягають у зміні динамічних властивостей вихідної динамічної структури за рахунок приєднання додаткових мас з пристроями, що демпфірують. До пасивних методів відносять також програмне управління частотою обертання шпинделя, наприклад, за гармонічним законом. По-друге, це активні методи (Active Chatter Control), що полягають у примусовому введенні в динамічну систему коливань із фазою, протилежною до регенеративних коливань, які потрібно загасити.

Всі такі методи потребують певних, іноді дуже витратних заходів щодо модернізації діючого обладнання. У той самий час дослідження причин виникнення коливань при різанні сприяли, розвитку третього методу, заснованого на управлінні режимом різання у відповідності до так званої діаграми сталості (Stability Lobes Diagram – SLD), що визначає зони стабільності обробної системи. Перспективність такого методу гарантується застосуванням верстатів з ЧПК де можливий вибір режиму різання в широкому діапазоні.

Проектування такої діаграми ґрунтується на математичній моделі процесу оброблення різанням, яка однозначно визначає механізм виникнення вібрацій при різанні. Для цього доречно скористуватися системним підходом до представлення процесу різання в замкненій обробній системі з урахуванням різання за слідом.

Процес різання відбувається в замкненій обробній системі W_c , сталість якої може бути визначена за критерієм Найквіста як для системи з негативним зворотним зв'язком. Практика дослідження динамічних систем металорізальних верстатів показує, що, як правило, такі системи є сталими, тобто діаграма Найквіста розімкненої системи на комплексній площині не охоплює точку з координатами $[-1, 0]$ (рис. 1, а). Тому для дослідження таких систем достатньо, не втрачаючи адекватності, представляти її як систему не вище четвертого, а радше навіть другого порядку.

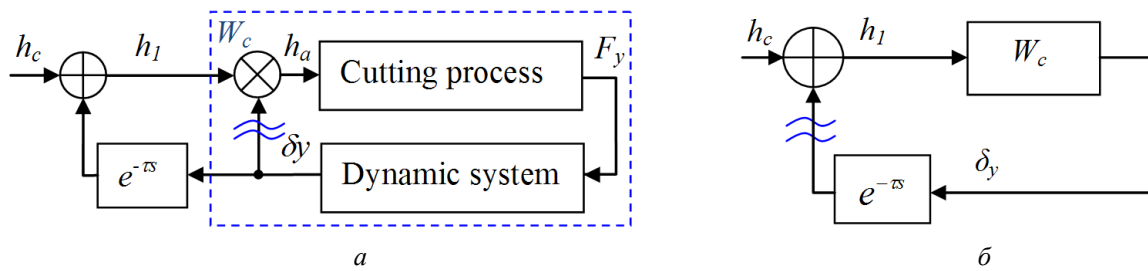


Рис. 1. Схема обробної системи: *a* – з урахуванням замкненості і оброблення за слідом; *б* – для визначення сталості

В той же час, при поглибленому вивченні процесів різання з'ясувалося, що в системі обов'язково виникають незатухаючі коливання, які називають регенеративними. Причиною таких коливань слід вважати оброблення за слідом, яке в структурі обробної системи представляється ланкою запізнення з передатною функцією $e^{-\tau s}$, де τ – час повторення різання, s – оператор Лапласа. Час повторення визначається в залежності від виду оброблення, наприклад, для токарного оброблення це час оберту заготовки, для фрезерування – час різання між двома сусідніми зубами фрези тощо.

Визначення сталості таких систем пропонувалося виконувати за підходом, який ґрунтується на аналізі коренів характеристичного рівняння [1], проте такий підхід не можна вважати доцільним, адже характеристичне рівняння системи з запізненням в зворотному зв'язку є трансцендентним, а приближене рішення містить певні недоліки.

Тому пропонується визначати сталість таких систем за новим критерієм, який ґрунтується на частотному підході з використанням діаграми Найквіста. Діаграму треба будувати аналогічно визначенню сталості в обробній системі W_c , з урахуванням запізнення, розмикаючи її за зворотним зв'язком (рис. 1, б), але новий критерій сталості треба формулювати наступним чином. Система з функцією запізнення в позитивному зворотному зв'язку буде сталою, якщо її діаграма Найквіста в розімкненому стані не охоплює точку з координатами $[+1, 0]$ на комплексній площині.

Валідність нового критерію сталості підтверджена натурними експериментами визначення сталості токарного оброблення [2]. На рис. 2 і 3 представлені результати дослідження обробної системи токарного верстату при порушенні умов сталості і при сталому процесі. На рисунках показані зразки поверхонь оброблених деталей, осцилограми моделювання процесів у часі з використанням процедури чисельного інтегрування Рунге-Кутта четвертого порядку і відповідні діаграми Найквіста на комплексній площині.

Аналогічні результати були отримані і при дослідженні процесів фрезерування на верстаті з ЧПК фірми HAAS [3]. Модель була представлена двомасовою системою де кожна маса з двома степенями свободи, обробкою за слідом за двома керованими координатами.

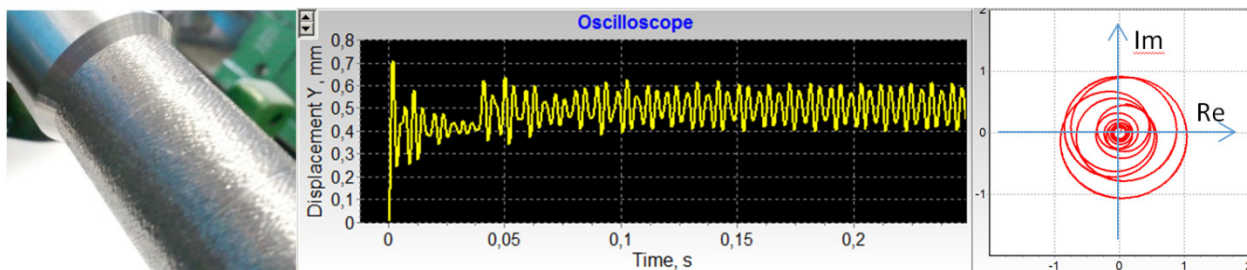


Рис. 2. Результати токарного оброблення при несталому процесі

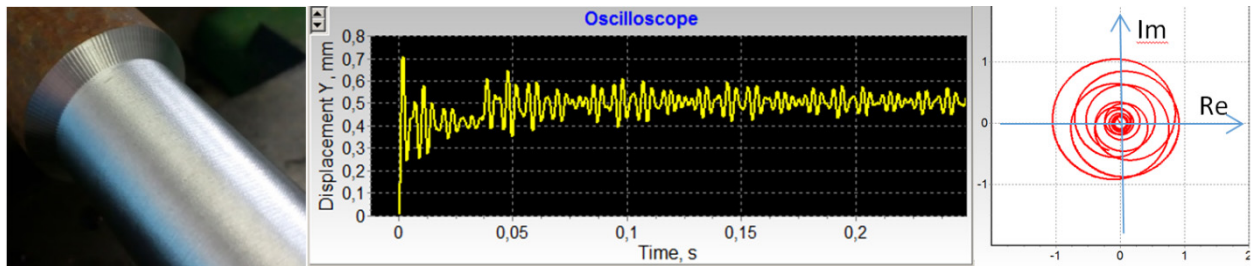


Рис. 3. Результати токарного оброблення при сталому процесі

В обох випадках динамічні системи були ідентифіковані з метою визначення їх характеристик. Ідентифікація виконувалась за методикою експериментального модального аналізу з використанням імпульсної характеристики, яка була отримана за сигналом акселерометра при ударному впливі спеціальним молотком. Такий сигнал, через швидкі перетворення Фур'є, був перетворений в амплітудно-частотну характеристику у вигляді спектру, де визначалась частота головних гармонік системи в напрямку координат, що управляються. Крім того, експериментально визначалась жорсткість системи в таких напрямках і розраховувався коефіцієнт затухання коливань.

Слід зауважити, що терміни “сталість” чи “втрата сталості” слід адаптувати до моделі, а не до реальної системи, оскільки створені моделі завжди є певним наближенням до повної адекватності. Тим не менш експериментально зафіксована кореляція, яка виявляється в аномальному збільшенні шорсткості обробленої поверхні в порівнянні з режимом різання, що відповідає сталості моделі.

Знайдений новий критерій сталості дозволив створити надійний алгоритм автоматичного проектування діаграми сталості. Так, на рис. 4 представлена діаграма сталості для моделі токарного оброблення. Діаграма побудована в координатах “швидкість шпинделя – глибина різання” і представляє лінію 1, яка розділяє весь простір можливих значень режиму різання на дві зони – сталий процес і несталий процес.

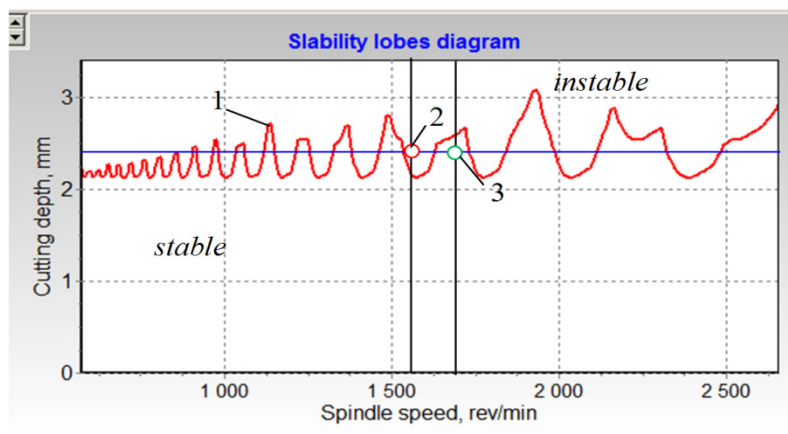


Рис. 4. Діаграма сталості для процесу токарного оброблення

На діаграмі виділені дві точки 2 і 3 режиму різання, що мають однакову глибину різання 2,3 мм, а швидкість шпинделя 1550 об/хв. і 1650 об/хв. відповідно. Аналіз діаграми сталості і результатів експериментальних досліджень показує, що випадкове призначення режиму різання без урахування отриманих закономірностей, як до речі і буває на виробництві, може приводити до несподіваних негативних наслідків.

Запропонований підхід до проектування діаграми сталості ґрунтується на використанні методики експериментального модального аналізу для визначення динамічних характеристик обробної системи. Методика експериментального модального аналізу передбачає проведення досліджень в системі, що знаходиться у статичному стані. Такий підхід створює певні труднощі для впровадження результатів роботи у виробництво. До того ж в процесі оброблення динамічні параметри обробної системи змінюються, що вносить певні похибки в алгоритм управління.

Тому подальше використання результатів дослідження з метою усунення, або зниження впливу регенеративних коливань в процесі оброблення деталей різанням планується з використанням методики операційного модального аналізу. Аналіз останніх публікацій за темою показує, що саме такий спосіб можливо використовує фірма OKUMA в технології під назвою NAVI [4]. Представляється CNC-верстат з вбудованим датчиком вібрацій і програмне забезпечення, результатом функціонування якого є ідентифікація спектру, і призначення режиму різання за діаграмою стабільності. Як виконуються такі операції і склад системи управління залишаються “KnowHow” фірми. Слід сподіватися, що використання нового критерію сталості і в цьому практичному напрямку дозволить досягти проривних результатів.

Список літератури

1. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design // Cambridge University Press, New York, NY 10013-2473, USA 2012. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511843723>
2. Данильченко М. А. Забезпечення динамічної якості технологічної обробної системи при точінні. Дисертація канд. техн. наук. Харків, 2021. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52472>
3. Сікайло М. О. Усунення вібрацій при кінцевому фрезеруванні на верстатах з ЧПК. Дисертація PhD, КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/33a7ba85-46e5-43fa-b139-0928e139e79c/content>
4. Intelligent Technology Machining NAVI. <https://www.okuma.com/machining-navi>

Ensuring the stability of the cutting process when machining parts on CNC machines

Y. Petrakov

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Annotation. The cutting process takes place in a closed elastic machining system and is always accompanied by vibrations, chatter which become the main limitation of the productivity of the manufacturing process of parts. It is proposed to ensure the stability of the cutting process by assigning the mode according to the Stability Lobes Diagram - SLD. An algorithm for the automatic construction of such a diagram according to a new stability criterion for closed systems with a feedback delay function has been developed. The results of modeling of turning and milling processes using a new stability criterion are presented. A system with a positive feedback delay function will be stable if its open-state Nyquist diagram does not span a point with coordinates $[+1,0]$ on the complex plane. Such results are fully confirmed by experimental studies using mechanisms of experimental modal analysis of dynamic systems. As a result, an application program for automatic determination of SLD during cutting was developed.

Keywords: Permanence of the cutting process, permanence diagram, modeling.