

Підвищення ефективності оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу точіння з високими частотами обертання шпинделя

Проаналізовано можливість підвищення ефективності оброблення деталей діаметром до 20 мм, а саме: сталості процесу різання при точінні за рахунок керування швидкістю різання в процесі обробки, прогнозуванню та вибору частот обертання, які забезпечують сталість оброблювальної системи керуванням динамікою процесу переміщенням додаткової маси. Розроблено методику дослідження вібраційних процесів при точінні. В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що при накладенні коливального руху на обертання шпинделя можна зменшувати загальний рівень коливань і за рахунок цього підвищувати якість обробленої поверхні. Доведено, що вибір заздалегідь відомої зони частот обертання шпинделя, при яких спостерігається найменше значення амплітуди коливань інструменту в радіальному до деталі напрямку дозволяє за рахунок збільшення частоти обертання шпинделя підвищувати продуктивність оброблення при збереженні вимог креслення за шорсткістю. Суміщення вузла власних форм коливань та зони різання, шляхом динамічного керування коливаннями супорта токарного верстата за рахунок збільшення інерційних характеристик верстата та зменшення при цьому амплітуди коливань різця дозволяє підвищити точність оброблення та зменшити шорсткість обробленої поверхні деталі на підвищених частотах обертання шпинделя.

Ключові слова: точіння; вібрація; шпиндель; висока частота обертання.

За рахунок зменшення розмірів агрегатів та механізмів частка деталей діаметром до 20 мм збільшується. Крім того зростають вимоги до якості оброблених поверхонь, що обумовлено необхідністю забезпечення відповідних експлуатаційних характеристик виробу, зокрема зносостійкості, протистояння стомлюючим навантаженням, збільшенню контактної жорсткості, вібросталості, міцності виробу при зменшенні його габаритних розмірів тощо. Необхідність забезпечення попиту ринку на деталі малого діаметру створює передумови для збільшення продуктивності процесу їх механічного оброблення. Підвищення продуктивності зрізання припуску при токарному обробленні деталей, поверхні яких мають діаметри до 20 мм, можливе, як правило, за рахунок підвищення швидкості різання. Разом з тим, підвищення швидкості різання (частоти обертання шпинделя) досить часто супроводжується зміною динамічного стану елементів обробної системи у зв'язку з виникненням вібраційних процесів, що пов'язано з відносно малою жорсткістю як оброблюваних поверхонь, так і самої заготовки.

Метою роботи є підвищення продуктивності токарних верстатів при обробленні деталей малого діаметра шляхом керування їх динамічним станом в процесі оброблення. У даній роботі вирішується наступна актуальна науково-технічна проблема: встановити джерела впливу параметрів динамічного стану елементів верстатної системи на якість обробленої поверхні (шорсткість) при точінні з високою частотою обертання та доказати можливість підвищення продуктивності обробки деталей малого діаметра шляхом управління ним з метою забезпечення конструкторських вимог креслення деталі.

Для реалізації поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання: розробити методику дослідження динамічного стану системи в процесі різання при токарній обробці з високою частотою обертання, розробити модель та експериментально перевірити вплив власних частот і форм коливань верстату на точність і шорсткість обробленої поверхні деталі, дослідити фактори, які впливають на збереження сталості обробної системи до автоколивань, що можуть супроводжувати процес різання.

На сьогоднішній день переважна кількість сучасних токарних верстатів і обробних центрів виробляються такими провідними виробниками металорізального обладнання, як Haas, Okuma, DMG, Mori Seiki, Gildemeister та деякими іншими [1, 2, 3]. Однак, більшість цих верстатів, нажаль, вкрай рідко має максимальну частоту обертання шпинделя більше 6000 об/хв. Разом з тим, наприклад, при обробці деталей діаметром до 10 мм із такою частотою швидкість різання буде складати лише 150 м/хв, а 20мм – 300 м/хв в той час як інструментальні матеріали, наприклад, тверді сплави, на сьогоднішній день дозволяють виконувати механічну обробку навіть чорних металів зі швидкостями різання понад 500 м/хв (на рисунку 1) [4, 5].

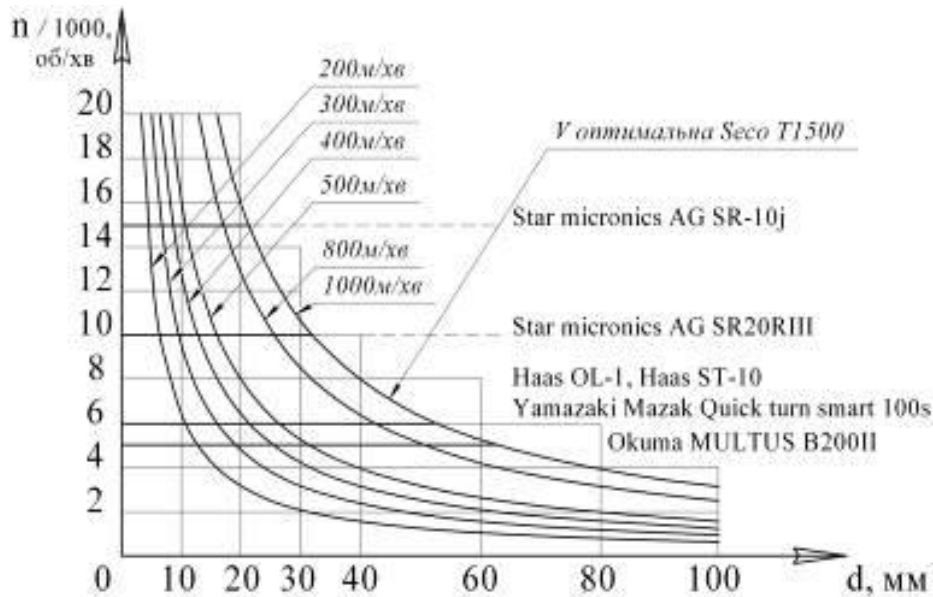


Рис. 1. Залежність швидкості різання від частоти обертання шпинделя і діаметра оброблюваної деталі

Аналіз показує, що для збільшення швидкості обробки деталей малих діаметрів за рахунок підвищення частоти обертання шпинделя необхідно синхронно забезпечити працездатність ріжучого інструменту з відповідним динамічним станом металообробного обладнання. При цьому вплив власних коливань обладнання на процес різання повинен бути мінімальним, а динамічні характеристики виконавчих органів повинні забезпечувати точну і синхронну роботу усієї обробної системи.

Однією з найсуттєвіших перепон при збільшенні частот обертання шпинделя у процесі оброблення є поява вібрацій в системі «верстат – пристосування – інструмент – деталь» (ВПД), які можуть суттєво впливати на якість (точність та шорсткість) обробленої поверхні. Багато вчених (В.О. Кудінов [6], J.Plusty [7], І.Г. Жарков [8], М.Е. Ельясберг [9], С.С. Кедров [10], Н.І. Ташлицький [11], S.Doі і S.Kato [12], М.Ессер [13], Ю.М. Внуков [14] та ін.) провели ряд досліджень щодо впливу коливань при різанні металів як на продуктивність процесу оброблення, так і на якість обробленої поверхні при різних видах оброблення різанням, у т.ч. і відносно нежорстких (мало жорстких) деталей. У процесі цих досліджень встановлено, наприклад, що при точінні деталей малих діаметрів швидкість знімання припуску при точінні в більшій мірі залежить від швидкості різання, ніж від подачі і глибини різання [15]. Це пов'язано, перш за все, з низькою жорсткістю деталей. При значному збільшенні частоти обертання заготовки ряд процесів, що відбуваються у верстаті, таких, як дисбаланс обертючих частин, биття шпинделя, уривчастість передачі обертання в кінематичних ланцюгах тощо, впливають на динамічний стан і, як наслідок, на якість механічної обробки [6, 15]. В дослідженнях проф. Внукова, присвячених обробці нежорстких деталей, доказано, що існує ризик виникнення нестабільних умов оброблення, обумовлених низькою вібросталістю оброблюваної деталі і високими амплітудами її коливань.

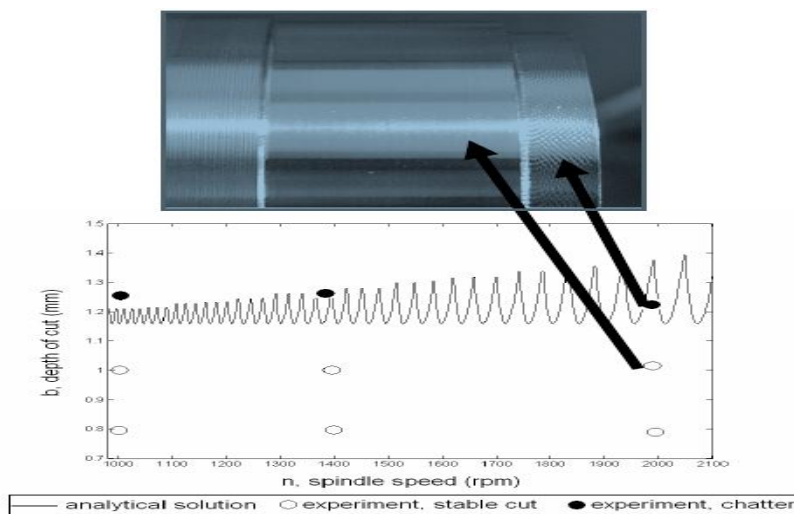


Рис. 2. Діаграма сталості системи до автоколивань [16]

Разом з тим, вченими E.Ozlu та E.Budak [16] доведено, що збільшення частоти обертання шпинделя на токарному верстаті не завжди призводить до збільшення амплітуди коливань виконавчих органів, і, як наслідок, погіршення шорсткості (рисунок 2). Тому для збільшення частоти обертання шпинделя при обробці необхідно або знайти зони сталого різання, або запропонувати алгоритм зменшення амплітуди коливань інструменту для забезпечення шорсткості обробки деталі в межах конструкторських вимог креслення

Аналіз показує, що на думку більшості дослідників, первинне збудження автоколивань (які вивчені вже досить добре) відбувається внаслідок впливу сукупності кількох взаємозалежних причин, з яких зазвичай одна або дві домінують в залежності від конкретних умов процесу різання [14].

Причини і механізми вторинного збудження автоколивань вивчені набагато меншою мірою. В роботах [8–11] та інших доказано важливе значення вторинного збудження для існування автоколивань та показано, що автоколивальний характер вібрацій, які виникають при обробці на металорізальних верстатах, грають і важливу роль у формуванні та підтримці шорсткості й хвилястості як на поверхні різання, так і на обробленій поверхні. Вторинне збудження коливань пов'язане саме зі зрізанням стружки по хвилястому сліду, який залишається на поверхні різання під час попереднього оберту деталі (рисунок 3) через вібропереміщення інструменту в напрямку, перпендикулярному поверхні різання. У вітчизняній і зарубіжній літературі це явище отримало назву: різання по «сліду» або різання в умовах регенерації.



Рис. 3. Регенерація автоколивань від «різання по сліду».

Достатньо повний аналіз цього підходу наведено в монографії проф. Свініна В.М. [17], де показано, що варіюванням частоти і глибини модуляції (зміни) швидкості різання можна домогтися позитивного результату в набагато більш широкій області технологічних параметрів. Автор вважає, оскільки коливання технологічної системи (ТС) завжди піддаються до сліду, то для придушення вторинних автоколивань необхідно поставити ТС в такі умови, щоб процес підстроювання відбувався постійно.

Для перевірки ефекту пригнічення автоколивань при точінні шляхом відбудови від «різання по сліду» розроблено експериментальні установки (її схема і принцип роботи представлені на рисунках 4 та 5) на базі верстатів 16К20Т1 та 1700ВФ30. В ланцюг зв'язку системи ЧПК та силового перетворювача приводу головного руху додано «Модулятор» (рисунок 5) для завдання частоти обертання шпинделя по синусоїдальному закону.

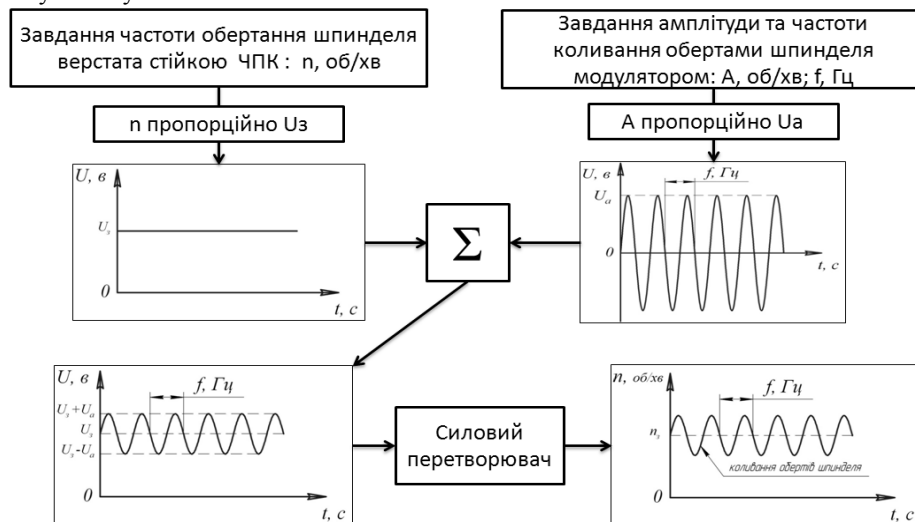


Рис. 4. Принцип роботи експериментальної установки для коливання частоти обертання шпинделя

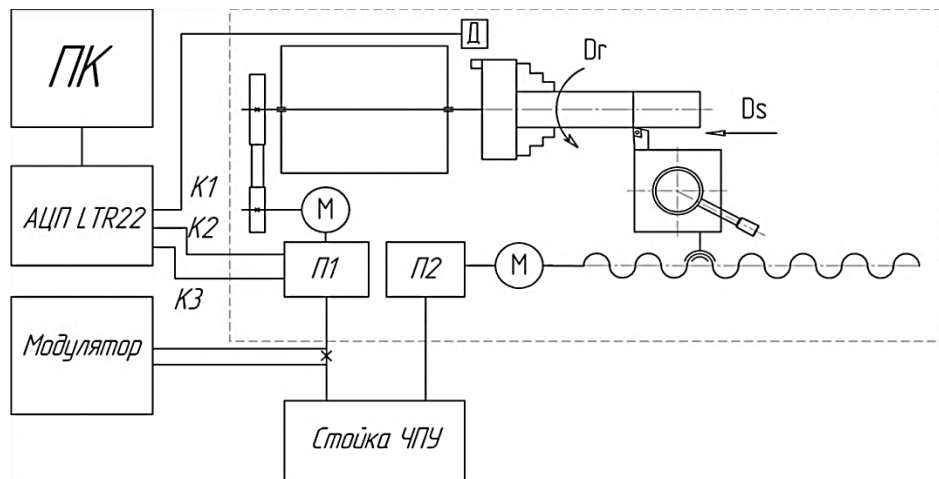


Рис. 5. Експериментальна установка для пригнічення автоколивань шляхом відбудови від «різання по сліду»: ПК – персональний комп'ютер, АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, Модулятор – перетворювач сигналу завдання приводу головного руху по синусоїдальному закону, П1 – силовий перетворювач приводу головного руху, П2 – силовий перетворювач приводу подачі, Д – безконтактний вимикач (БВК) Balluff 516324, К1 – канал підключення БВК, К2 – канал підключення датчика струму силового перетворювача, К3 – канал підключення датчика напруги якоря двигуна.

Дослідження динаміки роботи верстатів з модульованою частотою обертання шпинделя показали можливість значеного зменшення величини глибини модуляції при збільшенні основної частоти обертання та частоти модуляції. Це в першу чергу пов'язано із великою масою обертових частин токарних верстатів та значним збільшенням потужності, що потребується для постійного розгону та гальмування. Експериментальне дослідження зриву регенерації автоколивань на верстаті 16K20T1 показало працездатність розробленої системи в процесі обробки. Під час точіння заготовки діаметром 60 мм були створені умови для виникнення автоколивань. При ввімкненні модулятора при тому ж режимі обробки регенерація автоколивань пригнічується, при цьому шорсткість обробленої поверхні змінюється з Ra 1,7 до Ra 0,8.

Ці ж дослідження, проведені на верстаті 1700ВФ30, показали, що на частотах до 5000 об/хв має місце зменшення шорсткості з Ra 2,2 до 1,5 мкм (рисунком 6), у той час як при збільшенні частоти до 6800 об/хв змін шорсткості практично не було ні при точінні з модулятором, ні при точінні без нього.

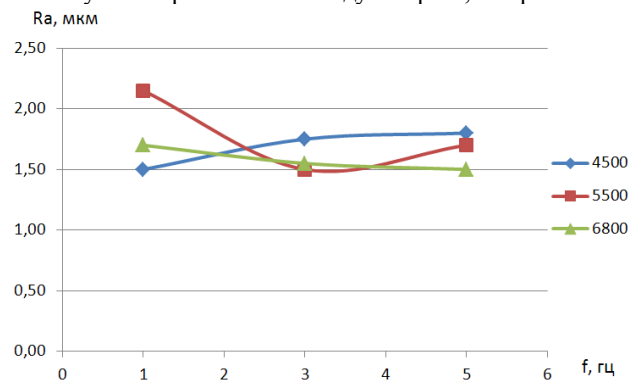


Рис. 6. Вплив модуляції частоти обертання заготовки на якість обробки

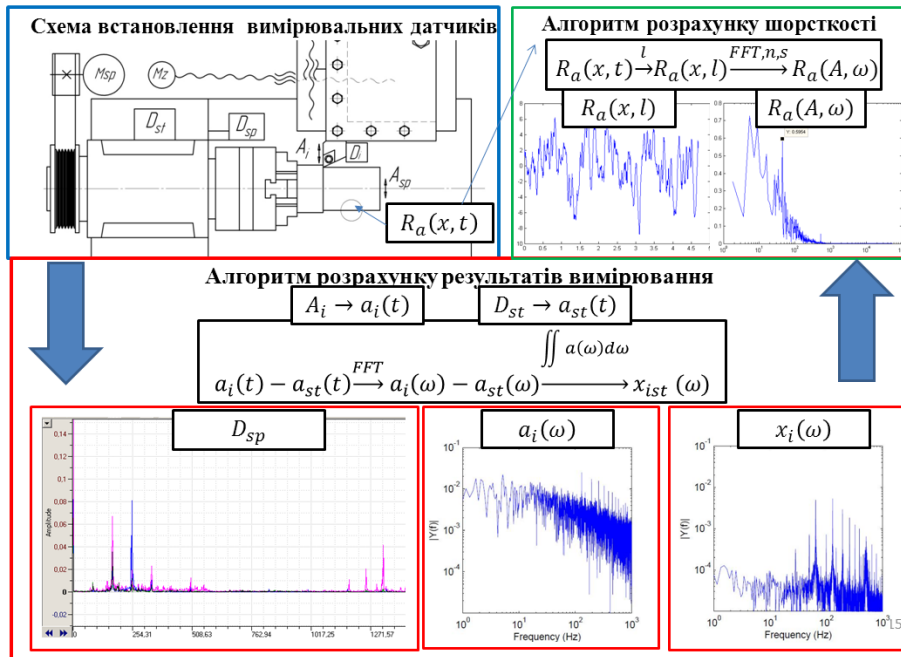


Рис. 7 – Методика дослідження динамічного стану обробної системи

Таким чином експериментально підтверджена гіпотеза про те, що автоколивання при частотах обертання наближених до власних резонансних частот системою не підтримуються, тобто причини збільшення вібраційної складової інші. Для встановлення цих причин запропонована спеціально розроблені модель динамічного стану ТС та методика дослідження динамічного стану технологічної системи, яка схематично представлена на рисунок 7 і полягає в наступному.

За допомогою акселерометрів, що встановлені на різці та шпindelній бабці, зчитуються величини миттєвих значень віброприскорень цих органів. Шляхом подвійного інтегрування віброприскорення перетворюються в віброзміщення. За базовий нуль прийнято положення станини в просторі. Відносно станини відбувається пряме вимірювання значення коливаний шпинделя за допомогою безконтактного датчика. Всі вимірювання синхронізовані в часі і приведені до однієї величини одиниць вимірювання. З урахуванням фази коливаний визначено відносні переміщення інструменту та заготовки.

Аналіз динамічного стану ТС запропоновано проводити за допомогою профілограми обробленої поверхні, по положенню основної гармоніки якої на відповідній частоті обертання шпинделя можна судити про те, чи є домінуючою в шорсткості обробленої поверхні саме геометрична складова.

Для практичної реалізації розробленої методики створено стенд на базі верстату 1700ВФ30 (рисунок 8) та розроблена його тривимірна скінчено елементна модель (рисунок 9). Основними особливостями стенду в порівнянні з базовою конструкцією верстату є збільшення потужності приводу головного руху та частоти обертання шпинделя до 10 000 об/хв.



Рис. 8. Стенд для обробки деталей точінням з частотою обертання шпинделя до 10 000 об/хв.

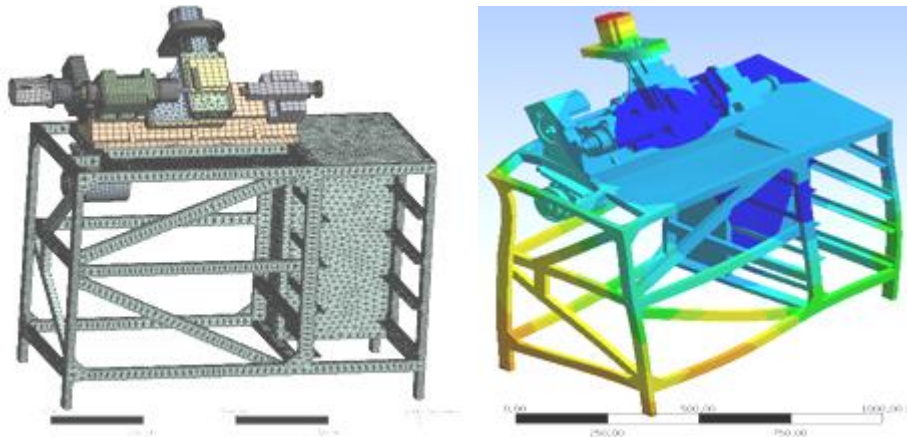


Рис. 9. Загальний вигляд тривимірної скінчено елементної моделі стенду

Дослідження характеристик стенду та моделювання системи методом скінчених елементів більш детально розглянуто в [18, 19].

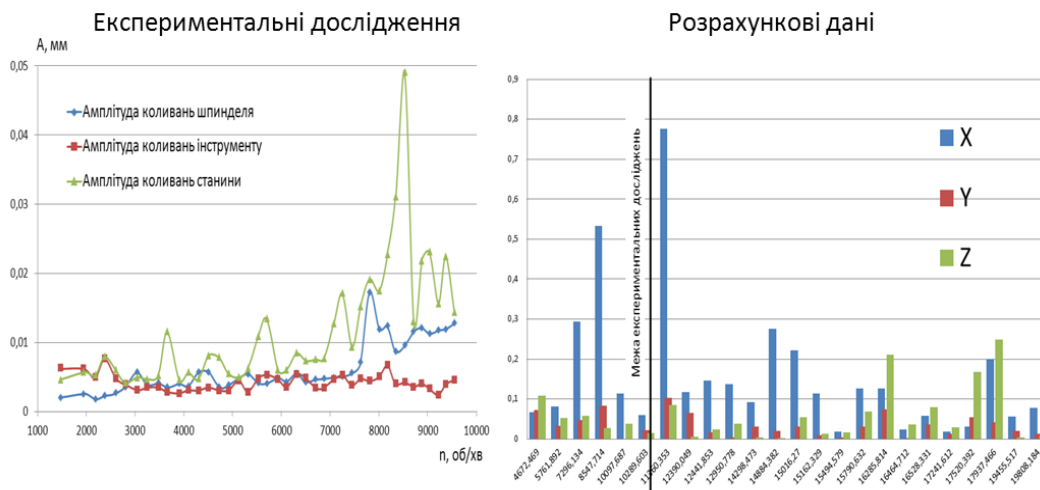


Рис. 10. Визначення амплітуд коливань робочих органів за допомогою моделі та експериментальним способом

Прогнозування амплітуд коливань шпинделя та інструменту за допомогою розробленої моделі показало її адекватність (в межах 5 %) з експериментальними дослідженнями у всьому діапазоні частот обертання шпинделя, які можна реалізувати за допомогою стенду (рисунок 10).

Прогнозування за допомогою моделі процесу обробки на частотах 15 500 об/хв. або 17 420 об/хв дозволяє встановлювати частоти обертів шпинделя при яких мають місце значні зменшення амплітуд коливань робочих органів, що ймовірно буде призводити до зменшення вібраційної складової шорсткості обробленої поверхні.

При наявності сил дисбалансу має місце збільшення амплітуди коливання інструменту в напрямку поперечного переміщення супорта, яке квадратично збільшується при збільшенні частоти обертання шпинделя, що викликає збільшення вібраційної складової шорсткості і є одним з обмежуючих факторів підвищення продуктивності. Дослідження цього явища проведено за допомогою як розробленої скінчено елементної моделі, так і експериментально. Для вивчення цього явища запропоновано до шпинделя прикладати силу з різними частотами (силу дисбалансу) відповідної величини і вимірювати амплітуду взаємного переміщення шпинделя та супорта в радіальному напрямку з урахуванням фаз цих переміщень. Експериментальні та модельні дослідження показують кількісну та якісну залежність між амплітудою коливань інструменту та шпинделя з шорсткістю обробленої поверхні в залежності від частоти діючої на систему сили дисбалансу. Доведено, що амплітуда коливань супорта верстату як реакції системи на збурюючу силу (силу дисбалансу) напряму відображаються саме на обробленій поверхні у якості зміни складових шорсткості (рисунок 11).

Експериментально встановлено, що одним із факторів, які можуть суттєво впливати на амплітуду коливання інструменту у процесі оброблення є його положення (супорта верстату) вздовж станини.

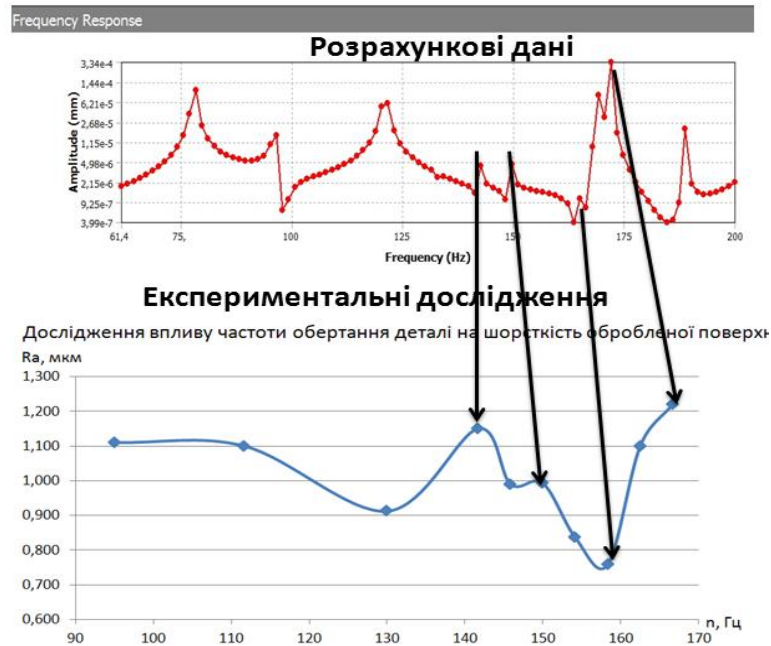


Рис. 11. Порівняння розрахункових даних залежності амплітуди переміщення інструменту в радіальному напрямку від частоти дії сили та експериментальних даних залежності шорсткості обробленої поверхні від частоти обертання шпинделя при постійному режимі обробкою

Дослідження впливу положення ріжучого інструменту на величину його коливання в радіальному напрямку проведено наступним чином. Оскільки амплітуда коливань напряму впливає на шорсткість обробленої поверхні, проведено визначення амплітуд коливань інструменту в різних його положеннях вздовж станини з розміщенням на ній додаткової маси. Проведеними експериментами доведено, що положення інструменту та розташування мас впливає на амплітуду його коливання (рисунок 12).

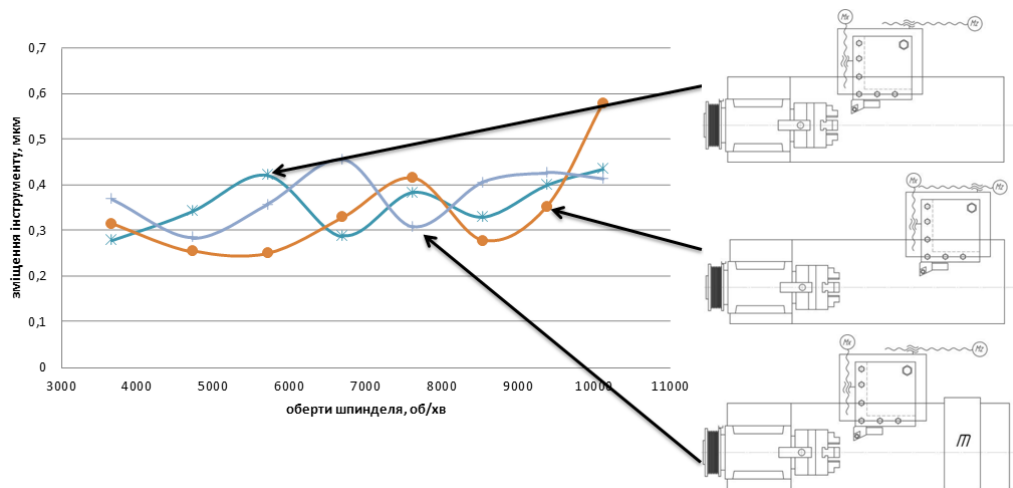


Рис. 12. Дослідження впливу положення ріжучого інструменту на амплітуду коливань в радіальному напрямку.

Це дозволило сформулювати принцип та алгоритм адаптивного керування власними частотами і формами коливань інструменту відносно заготовки (оброблюваної деталі), що забезпечують співпадання вузлів деформації з зоною різання, на основі яких розроблено спосіб динамічного керування коливаннями супорта верстата, схема якого представлена на рисунку 13.

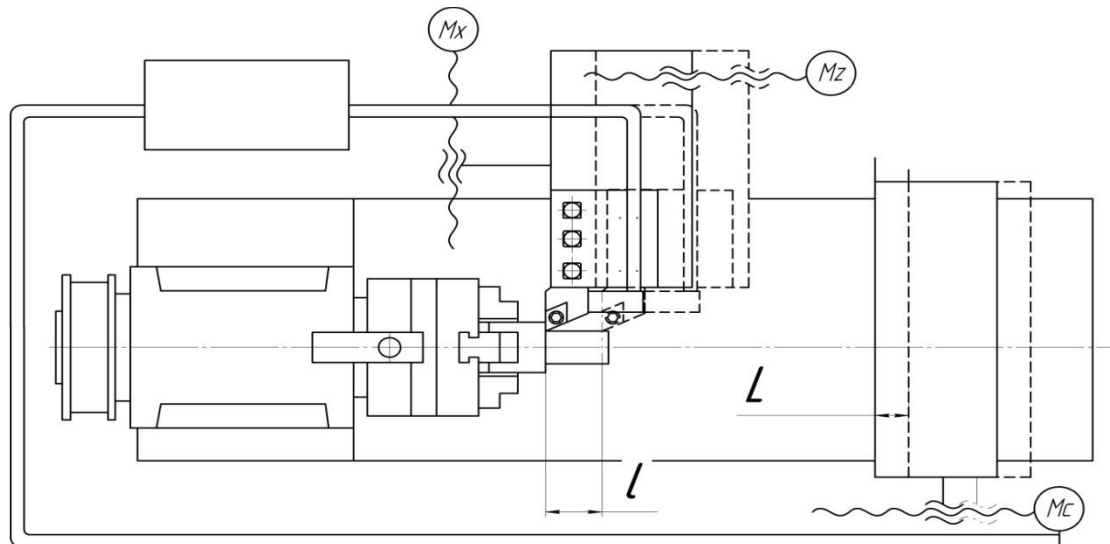


Рис. 13. Спосіб динамічного керування коливаннями супорта верстата.

Суть способу динамічного керування полягає у визначенні амплітуди коливань різця за допомогою акселерометрів, що встановлені безпосередньо на інструменті або поряд із ним. При цьому в режимі реального часу проводиться визначення миттєвого значення віброприскорення. Система має можливість керувати додатковою масою, що розташована на станині шляхом переміщення її за допомогою окремого приводу. Таким чином відбувається пошук системою керування локального мінімуму амплітуди коливань інструменту за допомогою синхронного переміщення керованої додаткової маси з поздовжнім переміщенням інструменту та утриманні зони обробки у вузлі коливань.

Висновки.

1. Виявлено технічне протиріччя, яке полягає в тому що з одного боку сучасні інструментальні матеріали дозволяють обробляти деталі із швидкостями більше 1000 м/хв, з іншого – більшість сучасних верстатів не дозволяють досягти цієї швидкості для деталей діаметром менше 20 мм у зв'язку з відносно малими частотами обертання шпинделя, що забезпечуються приводами головного руху більшості токарних верстатів. Висунуто обґрунтоване припущення, що резервом для підвищення продуктивності процесу токарної обробки деталей діаметром менше 20 мм з одночасним забезпеченням якості обробленої поверхні є динамічне керування процесом точіння з високими частотами обертання шпинделя.

2. Розроблений в роботі експериментальний стенд дозволив дослідити віброзміщення інструменту та шпинделя технологічної системи верстату в процесі різання при токарній обробці з високою частотою обертання в діапазоні до 10 150 об/хв.

3. Розроблена в роботі макрометрична скінчено-елементна модель токарного верстату, шляхом модального та гармонічного аналізу його виконавчих органів дозволила визначити та спрогнозувати значення власних резонансних частот та форм коливань обробної системи, визначивши їх вплив на шорсткість обробленої поверхні, та спрогнозувати амплітуду коливань інструменту в залежності від частоти обертання шпинделя.

4. Експериментально доказано, що основними джерелами коливань інструменту при точінні з високими частотами обертання шпинделя є автоколивання та коливання від збуджуючої сили системи «шпиндель-присрій-заготовка». Доведено, що забезпечення мінімальної шорсткості досягається шляхом зменшення відгуку системи на вимушену силу в зоні різання за рахунок:

- вибору заздалегідь відомої зони частот обертання шпинделя, при яких спостерігається найменше значення амплітуди коливань інструменту в радіальному до деталі напрямку,
- модуляції частоти обертання шпинделя з частотою від 1 до 5 Гц, що дозволило керувати зривом регенерації автоколивань за рахунок відбудови від різання «по сліду»;
- суміщення вузла власних форм коливань та зони різання, шляхом динамічного керування коливаннями супорта токарного верстата за рахунок збільшення інерційних характеристик верстата та зменшення амплітуди коливань різця, що дозволило підвищити точність обробки та шорсткість обробленої поверхні деталі на підвищених частотах обертання шпинделя.

Список використаної літератури:

1. CNC Turning Centers / Haas Automation Inc. – Oxnard : Haas Automation, Inc., 2013. – 56 p.
2. Machine Tools Catalogue / Okuma Europe GmbH. – Krefeld : Okuma Europe GmbH, 2013. – 192 p.
3. 24 Exclusive DMG MORI Technology Cycles / DMG MORI COMPANY LIMITED. – Vynterture : DGM MORI Company, 2016. – 62 p.
4. Taegu Turn. Токарный инструмент / Т.Таегу. – Daegu : TaeguTec Ltd., 2013. – 198 p.
5. Токарные инструменты // Sandvik Coromant ; под ред. E.Abele. – Stafford : Sandvik Coromant, 2015. – 1253 с.
6. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 367 с.
7. Thusty J. Basic non-linearity in machining chatter / J.Thusty, F.Ismail // CIRP Annals. – Manufacturing Technology – Elsevier, 1981. – Is. 1, Vol. 30. – Pp. 299–304.
8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
9. Эльясберг М.Е. Автоколебания металлорежущих станков: теория и практика / М.Е. Эльясберг. – СПб : ОКБС, 1993. – 180 с.
10. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М. : Машиностроение, 1978. – 198 с.
11. Ташлицкий Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / Н.И. Ташлицкий // Вестник машиностроения. – 1960. – № 2. – С. 10–20.
12. Doi S. Chatter vibration of lathe tools / S.Doi, S.Kato // Trans. ASME. – 1956. – № 78. – С. 1127–1134.
13. Brecher C. Simulation of the Process Stability of HPC Milling Operations under Consideration of the nonlinear Behaviour of the Machine Tool and the Cutting Process / C.Brecher, S.Witt, M.Esser // Annals of CIRP. – 2007. – Pp. 211–219.
14. Кучугуров М.В. Способ и устройство для исследования регенеративных автоколебаний при точении / М.В. Кучугуров, Ю.Н. Внукон, С.И. Дядя // Резание и инструмент в технологических системах. – Х., 2013. – № 83. – С. 42–54.
15. Основы теории резания материалов : учебник / Н.П. Мазур, Ю.Н. Внукон, А.И. Грабченко и др. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
16. Ozlu E. Analytical Prediction of Stability Limit in Turning Operations / E.Ozlu, E.Budak ; Sabanci University : Faculty of Engineering and Natural Sciences, 2010.
17. Свинин В.М. Фрезерование с модулированной скоростью резания / В.М. Свинин ; под ред. А.И. Промтова. – Иркутск : Изд-во ТТУ, 2007. – 304 с.
18. Шаповал Ю.В. Стенд для исследования процесса точения с высокими частотами вращения шпинделя / Ю.В. Шаповал, Д.В. Криворучко // Журнал инженерных наук. – 2014. – Т. 1. № 3. – С. 11–18.
19. Динамічне управління коливаннями при точінні / В.О.Залоза, Д.В. Криворучко, Ю.В. Шаповал, К.А. Дрофа // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – № 79. – С. 100–107.

References:

1. CNC Turning Centers (2013), Haas Automation Inc., Oxnard, 56 p.
2. Machine Tools Catalogue (2013), Okuma Europe GmbH, Krefeld, 192 p.
3. 24 Exclusive DMG MORI Technology Cycles (2016), DMG MORI COMPANY LIMITED, DGM MORI Company, Vynterture, 62 p.
4. Taegu, T. (2013), Tokarnyy instrument, TaeguTec Ltd., Daegu, 198 p.
5. Abele, E. (ed.) (2015), Tokarnyye instrumenty, Sandvik Coromant, Stafford, 1253 p.
6. Kudinov, V.A. (1967), Dinamika stankov, Mashinostroenie, Moskva, 367 p.
7. Thusty, J. and Ismail, F. (1981), «Basic non-linearity in machining chatter», CIRP Annals, Manufacturing Technology – Elsevier, Issue 1, Vol. 30, pp. 299–304.
8. Zharkov, I.G. (1986), Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom, Mashinostroenie, Leningrad, 184 p.
9. El'yasberg, M.E. (1993), Avtokolebaniya metallovezhushchikh stankov: teoriya i praktika, OKBS, SPb, 180 p.
10. Kedrov, S.S. (1978), Kolebaniya metallovezhushchikh stankov, Mashinostroenie, Moskva, 198 p.
11. Tashlitskiy, N.I. (1960), «Pervichnyy istochnik energii vzbuzhdeniya avtokolebaniy pri rezanii metallov», Vestnik mashinostroeniya, No. 2, pp. 10–20.
12. Doi, S. and Kato, S. (1956), «Chatter vibration of lathe tools», Trans. ASME, No. 78, pp. 1127–1134.
13. Brecher, C., Witt, S. and Esser, M. (2007), «Simulation of the Process Stability of HPC Milling Operations under Consideration of the nonlinear Behaviour of the Machine Tool and the Cutting Process», Annals of CIRP, pp. 211–219.
14. Kuchugurov, M.V., Vnukov, Yu.N. and Dyadya, S.I. (2013), «Sposob i ustroystvo dlya issledovaniya regenerativnykh avtokolebaniy pri tochenii», Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh, Kh., No. 83, pp. 42–54.
15. Mazur, N.P., Vnukov, Yu.N., Grabchenko, A.I. and others (2013), Osnovy teorii rezaniya materialov, NTU KhPI, Harkiv, 534 p.
16. Ozlu, E. and Budak, E. (2010), Analytical Prediction of Stability Limit in Turning Operations, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University.
17. Svinin, V.M. (2007), Frezerovanie s modulirovannoy skorost'yu rezaniya, in Promtova, A.I. (ed.), Izd-vo TTU, Irkutsk, 304 p.
18. Shapoval, Yu.V. and Krivoruchko, D.V. (2014), «Stend dlya issledovaniya protsessha tocheniya s vysokimi chastotami vrashcheniya shpindel'ya», Zhurnal inzhenernikh nauk, Vol. 1, No. 3, pp. 11–18.

19. Zaloga, V.O., Krivoruchko, D.V., Shapoval, Yu.V. and Drofa, K.A. (2017), «Dinamichne upravlinnya kolivannyami pri tochinni», *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 79, pp. 100–107.

Шаповал Юрій Володимирович – асистент, кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Україна.

Наукові інтереси:

- динаміка процесу точіння;
- вимірювання статичних та динамічних параметрів стану оброблювальних систем.

E-mail: diyuura@gmail.com.

Залого Вільям Олександрович – доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Україна.

Наукові інтереси:

– керує науковим напрямком з проблем «Створення нових та удосконалення існуючих технологічних процесів механообробного виробництва», на базі якого створено науково-педагогічну школу.

E-mail: zalogav@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 04.10.2017.