

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ШАПОВАЛ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.941.01/.02:621.71(043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ  
НА ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ ДИНАМІКОЮ  
ПРОЦЕСУ З ВИСОКИМИ ЧАСТОТАМИ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,  
верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Житомир – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор  
**Залога Вільям Олександрович**,  
Сумський державний університет, завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів, Міністерство освіти і науки України, м. Суми

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кузнєцов Юрій Миколайович**,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри конструювання верстатів та машин, Міністерство освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор  
**Луців Ігор Володимирович**,  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин, Міністерство освіти і науки України.

Захист відбудеться «06» березня 2018 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 14.052.02** у Житомирському державному технологічному університеті за адресою: м. Житомир вул. Чуднівська, 103 аудиторія № 248.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Житомирського державного технологічного університету за адресою: 10005, м. Житомир вул. Чуднівська, 103

Автореферат розісланий « 01 » лютого 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.А. Громовий

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У машино-, приладо-, авіабудуванні та інших галузях за рахунок зменшення розмірів агрегатів і механізмів постійно збільшується частка деталей, що являють собою тіла обертання розмірами до 20 мм (корпуси вимірювальних датчиків, короткі осі приладів і літальних апаратів, плунжери гідравлічних дозаторів і блоків живлення, наконечники струмознімачів зварювального обладнання, штифти тощо), технологія виготовлення яких вимагає токарного оброблення. Крім того, зростають вимоги до якості оброблених поверхонь цих деталей, що обумовлено необхідністю забезпечення відповідних експлуатаційних характеристик виробу, зокрема, міцності у разі зменшення його габаритних розмірів, зносостійкості, протистояння навантаженням від утомленості, збільшенню контактної жорсткості, вібросталості тощо. Необхідність забезпечення попиту ринку, що постійно змінюється, на деталі малого діаметра створює передумови для збільшення продуктивності процесу їх механічного оброблення. Підвищення продуктивності зрізання припуску під час токарного оброблення деталей, поверхні яких мають діаметри до 20 мм, у зв'язку з їх відносно малою жорсткістю можливе, як правило, за рахунок підвищення швидкості різання.

Технологія оброблення деталей із різних конструкційних матеріалів із відносно високими швидкостями різання під час токарного оброблення може забезпечити у відповідно до вимог необхідну якість і в багатьох випадках виключити необхідність додаткового фінішного оброблення. Це стало можливим із розвитком інструментальних матеріалів для лезового оброблення, наприклад твердих сплавів, зокрема зі зносостійкими покриттями, що дозволяють виконувати механічне оброблення деталей навіть із чорних металів (сталей, сплавів, чавунів тощо) зі швидкостями різання понад 500 м/хв, а з кольорових (алюмінієвих, мідних тощо) металів і сплавів зі швидкостями понад 1 000 м/хв. Таким чином, можна стверджувати, що потенційними резервами підвищення продуктивності під час точіння є здатність сучасних інструментальних матеріалів різати з високою швидкістю, а для деталей, що мають малі розміри (діаметри до 20 мм), з частотами обертання шпинделів – 6 тисяч об/хв та більше.

Аналіз показує, що для збільшення швидкості оброблення деталей малих діаметрів за рахунок підвищення частоти обертання шпинделя для отримання необхідної (заданої кресленням) точності й шорсткості оброблених поверхонь необхідно забезпечувати сталий динамічний стан металообробного обладнання. При цьому вплив коливань обладнання на процес різання повинен бути мінімальним, а динамічні характеристики виконавчих органів повинні забезпечувати точну й синхронну роботу всієї обробної системи.

Сьогодні вироблено досить велику кількість сучасних металообробних верстатів та оброблювальних центрів, у яких максимальна частота обертання шпинделя знаходиться, як правило, в межах до 5 – 6 тис. об/хв. Водночас при їх практичному застосуванні одним із важливих питань є забезпечення сталого

динамічного стану відповідних елементів верстатного обладнання, таких як шпиндельні вузли, супортні системи, допоміжні пристрої та ін.

Збільшення частот обертання шпинделів під час оброблення деталей, що мають поверхні діаметром до 20 мм, для зведення швидкості різання до значень, рекомендованих виробниками інструментів (наприклад, твердосплавних під час оброблення сталей – 250 – 300 м/хв), може призводити до втрати динамічної сталості відповідних елементів обробної системи та погіршення відповідних показників якості. Це пов'язано з тим, що за високої частоти обертання шпинделя значно збільшується дисбаланс системи «шпиндель – пристрій – заготовка», внаслідок цього досить часто сила дисбалансу може значно перевищувати силу різання та відповідно істотно впливати на динамічний стан усієї обробної системи.

Таким чином, розроблення принципів керування динамікою процесу оброблення на токарних верстатах під час точіння деталей діаметром до 20 мм із високими частотами обертання шпинделя є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить підвищити продуктивність оброблення зазначених деталей при одночасному забезпеченні вимог креслення за шорсткістю.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету в рамках науково дослідних робіт МОН України: «Комплексне розроблення інтегрованих технологій підвищення якості виготовлення деталей відповідального призначення шляхом зменшення вібрацій при різних видах обробки» (ДР № 0112U005941) та «Підвищення вібростійкості процесів фрезерування та точіння складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів на основі керування і оптимізації геометрії різальної частини інструментів» (ДР № 0113U000136с), під час реалізації яких здобувач був виконавцем окремих етапів, а також «Комплексне розроблення методів підвищення ефективності оброблення важкооброблюваних матеріалів у різних температурно-кліматичних умовах за рахунок удосконалення різальних інструментів та умов їх застосування» (ДР № 01115U000510), під час реалізації якої здобувач був відповідальним виконавцем.

#### **Мета і завдання дослідження**

*Мета дослідження* полягає у підвищенні продуктивності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамічним станом технологічної системи для забезпечення шорсткості обробленої поверхні вимогам креслення.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- проаналізувати можливість підвищення продуктивності оброблення деталей діаметром 5–20 мм та встановити джерела впливу на шорсткість обробленої поверхні під час точіння з високою частотою обертання шпинделя;
- розробити методику, спроектувати і виготовити стенд для дослідження коливань інструменту та шпинделя токарного верстату в процесі різання з високою частотою його обертання;

- розробити скінченоеlementну модель станда та експериментально перевірити вплив власних частот і форм коливань елементів верстата на шорсткість обробленої поверхні деталі;
- розробити способи зменшення амплітуд коливань робочих органів токарного верстата під час оброблення з високою частотою обертання шпинделя;
- розробити практичні рекомендації щодо впровадження результатів досліджень для підвищення продуктивності процесу оброблення точінням деталей, що мають відносно малі діаметри, при збереженні вимог креслення за шорсткістю оброблених поверхонь.

*Об'єкт дослідження* – динаміка процесу точіння.

*Предмет дослідження* – динамічний стан токарного верстата в процесі обточування поверхонь деталей малого діаметра з високими частотами обертання шпинделя та заданою шорсткістю обробленої поверхні.

**Методи дослідження.** Роботу виконано на основі положень теорії різання, теорії автоматичного керування, теорії коливань і хвиль, теоретичної механіки та динаміки. Експериментальне дослідження динамічного стану процесу точіння виконане з використанням методу реєстрації сигналу віброприскорень інструменту й віброзміщення шпинделя та подальшої реєстрації їх у синхронному режимі системою збирання даних на базі ПК. Оброблення сигналу проведене за допомогою пакета програм Matlab чисельними методами. За допомогою математичних прийомів усі сигнали зведено до однієї фізичної величини з однаковою розмірністю – вібропереміщення. Запропоновані в дисертаційній роботі алгоритми, результати і висновки підтверджені чисельними моделюючими та експериментальними дослідженнями.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

- вперше для токарного оброблення з високими частотами обертання шпинделя встановлена функціональна залежність вібраційної складової шорсткості обробленої поверхні від зовнішніх збурювальних сил і власних форм та частот коливання ТОС, що дало можливість ефективно керувати процесом обробки;
- вперше встановлено, що суміщення вузла коливань системи шляхом переміщення додаткової маси з зоною оброблення при точінні з високою частотою обертання шпинделя призводить до зниження шорсткості оброблюваної поверхні за рахунок зменшення амплітуди коливання інструмента, внаслідок зміни форм власних коливань ТОС;
- набуло подальшого розвитку визначення меж застосування ефекту пригнічення регенеративних коливань методом динамічного варіювання частотою обертання шпинделя у зв'язку зі зміною співвідношення між довжиною хвилі коливань різальної кромки та довжини пройденого нею за цей час шляху по поверхні заготовки;
- набуло подальшого розвитку обґрунтування наявності ефекту зміщення в сторону низьких частот кроку мікронерівностей обробленої поверхні, яке виникає при токарній обробці внаслідок активації коливань з частотою рівною різниці частоти обертання шпинделя та власної частоти коливань ТОС (ефект

биття в теорії коливань), що дозволяє керувати шорсткістю оброблюваної поверхні за рахунок зміни співвідношення між цими частотами коливань.

### **Практичне значення роботи для машинобудування України**

1. Розроблена інженерна методика динамічного керування частотами обертання шпинделя, що дозволяє підтримувати шорсткості оброблених поверхонь у межах вимог креслень.

2. Розроблено технічну інструкцію з алгоритмом динамічної зміни частоти обертання заготовки для зриву регенерації автоколивань під час оброблення деталей малого діаметра з високою частотою обертання шпинделя, що була впроваджена у виробництво на ТОВ «КБ Укрспецмаш» при виготовленні деталей торцевих ущільнень відцентрових нафтових насосів марок НК, НКВ, НПС.

3. Новизна технічних рішень здобувача підтверджується двома патентами: Спосіб завантаження металорізального верстата прутком (Пат. 103688U Україна МПК (2015.01) B23B 13/00), Спосіб динамічного управління коливаннями супорта верстата (Пат. 107301 U Україна, МПК B23Q 15/12),

4. Використання в ТОВ «КБ Укрспецмаш» запропонованих рекомендацій щодо керування динамічним станом елементів обробної системи при виготовленні аксіально-рухомої втулки дозволило зменшити під час токарного оброблення шорсткість поверхні до Ra 0,4 мкм та за рахунок цього виключити з технологічного процесу операції її полірування, що забезпечило зменшення основного часу на 12 % та одержання при виготовленні однієї деталі економічного ефекту сумою 153,00 грн.

5. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету.

**Особистий внесок здобувача** полягає в проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, розробленні алгоритмів і програмного забезпечення, модельних випробувань, що виконані здобувачем самостійно. Постановка завдань та аналіз результатів досліджень виконані разом з науковим керівником. Написання статей і патентів відбувалося в співавторстві із співробітниками кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідалися та обговорювалися на восьми наукових конференціях, основними з яких є: XIII Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», (м. Кременчук, 2013 р.); XIV Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», (м. Суми, 2014 р.) XV Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», (м. Житомир, 2015 р.), XVII Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», (м. Чернігів, 2017 р.), Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і

студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 2015 р.), III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, (м. Суми, 2014 р).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 18 наукових публікаціях, з яких: 8 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз, 8 тез доповідей на науково-технічних конференціях та 2 патенти.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації – 193 сторінки, зокрема 68 рисунків, 21 таблиця, перелік використаних джерел з 146 найменувань на 15 сторінках, 5 додатків на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність роботи. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглядаються технологічні можливості сучасних інструментальних матеріалів та верстатів щодо оброблення деталей діаметром 5–20 мм. Проаналізовано фактори, що обмежують можливості токарних верстатів забезпечувати рекомендовану виробниками інструментів швидкість різання для таких деталей. Розглянуті існуючі методологічні підходи з моделювання динамічного стану металообробних технологічних систем.

Під час точіння деталей діаметром 20 мм і менше максимально досяжна швидкість різання для більшості традиційно використовуваних токарних верстатів, які мають, як правило, максимальну частоту обертання шпинделя до 5 000 – 6 000 об/хв, орієнтовно становить 200- 300 м/хв. Водночас сучасні інструментальні матеріали дозволяють різати зі швидкостями, що можуть перевищувати 1 000 м/хв. Під час точіння деталей малих діаметрів швидкість знімання припуску більшою мірою залежить від швидкості різання, ніж від подачі та глибини різання. Це пов'язано з відносно низькою жорсткістю деталей. При значному збільшенні частоти обертання заготовки ряд процесів, що відбуваються у верстаті, таких як дисбаланс обертових частин, биття шпинделя, уривчастість передавання обертання в кінематичних ланцюгах тощо, впливають на динамічний стан обробної системи і, як наслідок, на якість механічного оброблення.

Вивченню методів керування динамікою методів механічної обробки присвячені праці Ю.М. Внукова, І.Г. Жаркова, М.Ф. Каширіна, С.С. Кедрова, В.О. Кудінова, Ю.М. Кузнецова, І.В. Луціва, В.І. Марчука, П.П. Мельничука, Г.О. Оборського, В.М. Подураєва, В.М. Свініна, О.П. Соколовського, В.Б. Струтинського, Н.І. Ташлицького, Д.Ю. Федориненка, В.М. Чуприни, D. Kumabe, A. Otto, J.S. Park, J. Tlusty та інших. Дослідженнями цих вчених доведено, що збільшення частоти обертання шпинделя, як правило, призводить до недостатньої вібросталості процесу різання, що спричиняє незадовільну

шорсткість обробленої поверхні, а відповідно й зниження продуктивності процесу механічного оброблення. Шорсткість обробленої поверхні є найбільш чутливою до вібрацій у ТС, ніж інші параметри якості, оскільки відносне коливання інструменту та шпинделя разом із заготовкою й оброблюваною деталлю відображаються саме на мікрогеометрії її поверхні. Наприклад, відомо, що з допуском на розмір за 6-м квалітетом коливання круглості в межах 2–3 мкм не є критичним, у той час як збільшення шорсткості на 2–3 мкм є недопустимим.

Поряд з аналітичними та експериментальними методами моделювання динамічних станів обробних систем на сьогодні значного поширення набули чисельні методи моделювання динамічних процесів у технічних системах, зокрема під час моделювання станів верстатів. Найбільш істотний доробок у цьому напрямку зробили такі українські дослідники, як Н.Е. Веселовська, Ю.М. Кузнєцов, І.В. Луців, П.П. Мельничук, В.Б. Струтинський, В.М. Чуприна та інші. Більшість праць присвячені розробленню математичних моделей пружної системи верстата, що враховують просторову жорсткість окремих підсистем верстата. При математичному моделюванні окремих підсистем при циркуляційному навантаженні запропоновано виконувати аналіз впливу співвідношень параметрів жорсткості елементів обробної системи на деформацію підсистеми «інструмент – оброблювана деталь», що дозволило визначити траєкторії взаємного переміщення інструменту і деталі та встановити ступінь впливу динамічного стану системи на точність і шорсткість обробленої поверхні. П.П. Мельничуком та В.Б. Струтинським розглянуті математичні моделі на основі спектрального аналізу динамічних процесів металорізальних верстатів, зокрема визначення домінуючої частоти токарного верстата за спектральним аналізом круглограми обробленої поверхні. За допомогою запропонованих В.М. Чуприною методик моделювання проведено порівняльний аналіз сучасних методів і програм для динамічного розрахунку і моделювання шпиндельних вузлів. Він довів, що метод скінчених елементів забезпечує точні результати розрахунку статички і власних частот системи, а розрахунок форм коливань цим методом є приблизним, тому що застосовується при цьому опосередкований коефіцієнт демпфірування для всієї конструкції. Проф. В.М. Свініним доведено, що зменшувати вібрації у ТС можна шляхом варіювання частотою та глибиною модуляції (змінюю) швидкості різання.

Однак, не всі важливі рішення знайшли відображення в сучасній літературі, тому проведений аналіз дозволив сформулювати мету й основні задачі досліджень.

**Другий розділ** присвячений методичному забезпеченню теоретичних та експериментальних досліджень динамічного стану обробної системи у процесі точіння з високою частотою обертання шпинделя поверхонь, що мають відносно малі діаметри (до 20 мм). У розділі викладено загальну методику проведення досліджень, розроблено методику визначення динамічних характеристик верстата, здійснено опис використаних вимірювальних пристроїв, наведено схему та принцип дії модулятора і модернізованого профілометра.



Експериментальні дослідження виконано на експериментальному стенді (рис. 1), що складається з: модернізованого токарного верстата високої точності з числовим програмним керуванням (ЧПК) моделі 1700ВФ30 зі збільшеною потужністю привода головного руху до 1 500 Вт, що дозволило забезпечити частоту обертання шпинделя в діапазоні від 300 до 10 000 об/хв;

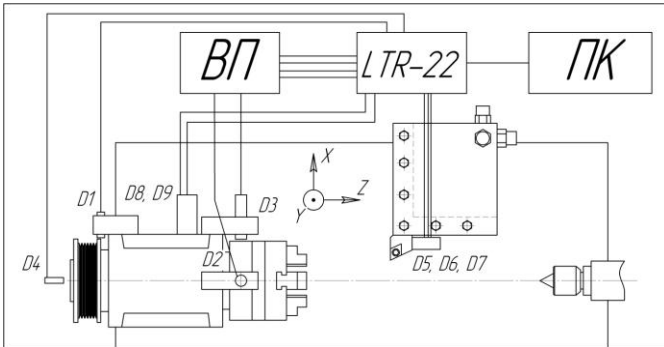


Рисунок 1 – Схема установки датчиків

вібродіагностичного обладнання, що дозволило вимірювати та відцифровувати сигнали амплітуд коливань деталі та різального інструменту, а також виконувати модальний аналіз сконструйованого стенду та визначати його АЧХ, і модулятора сигналу завдання. Модулятор дозволяє керувати частотою обертання шпинделя за

синусоїдальним законом під час точіння заготовки лівим відігнутих прохідним різцем із головним кутом в плані  $93^\circ$ , оснащеним змінною ромбічною непереточуваною пластиною з твердого сплаву СТ35М із покриттям.

Вібраційне прискорення станини вимірюється стандартним акселерометром Analog Device моделі ADXL 321, встановленим на шпиндельній бабці поряд із підшипником шпинделя і є базою для вимірювання віброприскорення інструменту за допомогою датчика ADXL326. Значення вібропереміщень визначаються за допомогою подальшого подвійного інтегрування методом трапецій. Вимірювання переміщень шпинделя відносно передньої бабки виконується за допомогою безконтактного індуктивного датчика переміщення XS1 M18AB120. Узгодження роботи всіх датчиків за часом відбувається по передньому фронту нуль-мітки датчика повороту шпинделя. Оцифровування сигналів усіх датчиків і передавання їх на персональний комп'ютер (ПК) проводиться за допомогою чотириканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) із незалежними входами для віброакустичних досліджень компанії L-CARD моделі LTR22.

Оцінювання якості обробленої поверхні здійснювали за параметром шорсткості  $Ra$  на модернізованому профілографі П-283 із похибкою 12 % відповідно до методик ГОСТ 27964–88 та ISO/P-468. Модернізація профілографа П-283 (рис. 2) полягала у його оснащенні датчиком для вимірювання реальної довжини поверхні деталі 4, що дозволило стежити за переміщенням вершини різця стосовно деталі за відомих частот обертання шпинделя та подачі у процесі точіння дослідних зразків із різних оброблюваних матеріалів (сталь, алюмінієвий сплав тощо). Апаратно описана модернізація була реалізована шляхом приєднання датчика обертів приводного двигуна 5 який через редуктор 3 переміщує вимірювальну головку 2. Одержаний сигнал у цифровому вигляді передавався через АЦП LTR-22 7 на ПК 9, це дозволило виконати спектральний аналіз шорсткості обробленої поверхні 1. Фактичне значення шорсткості знімається з шкали приладу 6 (рис. 3).

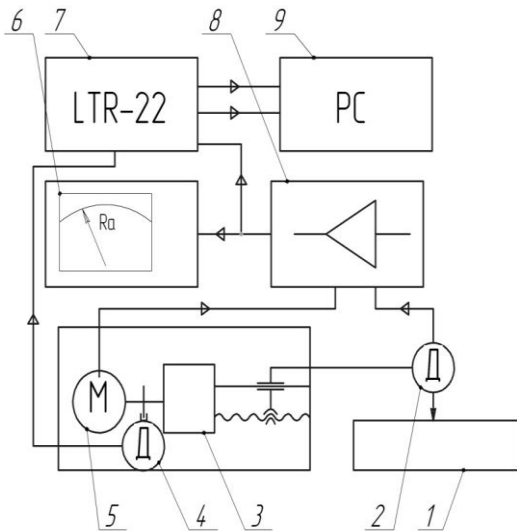


Рисунок 2 – Принципова схема модернізації профілометра П-283

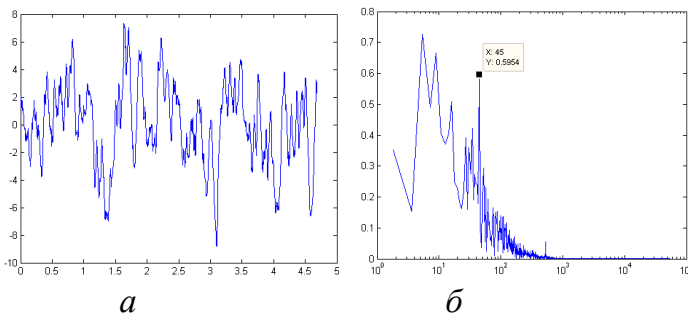


Рисунок 3 – Профілограма (а) та її спектральний аналіз (б)

модуляції, що забезпечує можливість керування зривом регенерації автоколивань за рахунок відбудови різання «по сліду».

**Третій розділ** присвячено моделюванню досліджень модальних характеристик токарного верстата з різними положеннями двигуна для привода

Модулятор сигналу призначений для змінення частоти обертання шпинделя за гармонічним законом. Прилад змінює сигнал завдання, що подається із системи ЧПК на силовий перетворювач привода головного руху (рис 4). Для обертання шпинделя з заданою частотою система ЧПК виробляє сигнал завдання постійного струму  $U_z$ , який пропорційний потрібній частоті обертання шпинделя. Модулятор складається з двох основних складових частин - генератора та суматора.

Генератор виробляє сигнал синусоїдальної форми, амплітуда якого пропорційна глибині модуляції

обертання шпинделя, а частота сигналу – частоті модуляції. За допомогою суматора ці два сигнали складаються та подаються на силовий перетворювач привода головного руху. Таким чином, за допомогою модулятора стає можливим змінювати частоту обертання шпинделя із заданими значеннями глибини та частоти

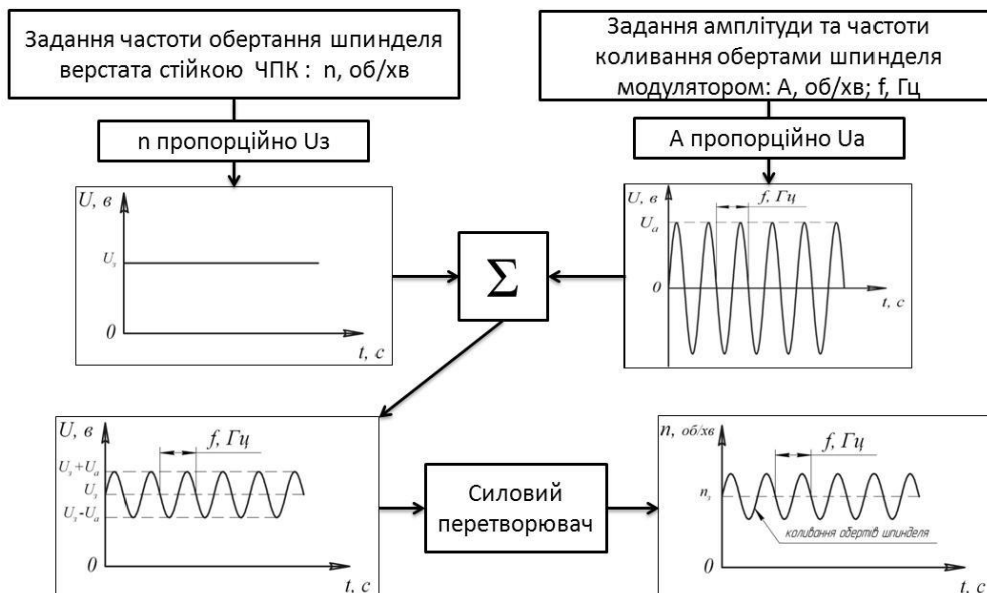


Рисунок 4 – Принципова схема роботи модулятора

поздовжньої подачі: з передаванням крутного моменту через зубчасті колеса та безпосередньо на вісь через муфту. Дослідження виконано методом скінчених елементів (СЕ) на макромеханічному рівні деталізації з роздільним завданням фізико-механічних властивостей матеріалів основних вузлів верстата, що дозволило розробити теоретичну методику розрахунку власних частот верстата методом СЕ та виконати модальний аналіз на основі матричного рівняння виду:

$$[M] \{u''\} + [C] \{u'\} + [K] \{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

де  $[M]$  – матриця мас;  $[C]$  – матриця опорів;  $[K]$  – матриця жорсткості;  $\{u''\}$  – вектор вузлових прискорень;  $\{u'\}$  – вектор вузлових швидкостей;  $\{u\}$  – вектор вузлових переміщень;  $\{F\}$  – вектор навантажень.

Передбачається, що за сталого процесу всі точки конструкції рухаються з однією й тією самою заданою частотою, але можна при цьому використовувати і різні зсуви за фазою залежно від наявності демпфірування. Отже, переміщення можна подати як:

$$\{u\} = \{u_{\max} e^{i\varphi}\} e^{i\Omega t}, \quad (2)$$

де  $u_{\max}$  – амплітуда переміщень,  $i$  – уявна одиниця,  $\Omega = 2\pi f$  – зовнішня кругова частота,  $f$  – частота зовнішніх сил,  $t$  – час,  $\varphi$  – зсув фаз для переміщень (у радіанах). Зауважимо, що  $u_{\max}$  і  $\varphi$  можуть бути різні для різних ступенів вільності.

Для формулювання проблеми вимушених коливань використовуються комплексні позначення. У цьому разі попереднє рівняння можна подати у вигляді:

$$\{u\} = \{u_{\max} (\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi)\} e^{i\Omega t}. \quad (3)$$

Вектор сил може бути визначений аналогічно вектору переміщень:

$$\{F\} = \{F_{\max} e^{i\psi}\} e^{i\Omega t}, \quad (4)$$

або

$$\{F\} = \{F_{\max} (\cos \psi + i \cdot \sin \psi)\} e^{i\Omega t}, \quad (5)$$

де  $F_{\max}$  – амплітуда сил,  $\psi$  – зсув фаз для сил (у радіанах).

Після підставлення (3) та (5) в (1) одержимо:

$$([K] - \Omega^2 [M] + i\Omega [C]) (\{u_1\} + i\{u_2\}) = \{F_1\} + i\{F_2\}, \quad (6)$$

де  $u_{\max}$  – амплітуда переміщень;  $\{u_1\} = \{u_{\max} \cos \varphi\}$  – дійсна частина і  $\{u_2\} = \{u_{\max} \sin \varphi\}$  – уявна частина вектора переміщень;  $F_{\max}$  – амплітуда сил;  $\psi$  – зсув фаз для сил (в радіанах);  $\{F_1\} = \{F_{\max} \cos \psi\}$  – дійсна частина вектора сил;  $\{F_2\} = \{F_{\max} \sin \psi\}$  – уявна частина вектора сил.

Метод суперпозиції мод (МСМ) для вирішення рівняння (6) використовує власні частоти і форми коливань для аналізу усталених вимушених гармонійних коливань. В основу МСМ покладене розкладання невідомого розв'язку за власними модами і перехід до модальних координат  $y_i$ .

$$\{u\} = \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} y_i \quad (7)$$

де  $n$  – число використовуваних мод.

Після підставлення виразу (7) в рівняння руху (1), одержимо

$$[M] \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} \ddot{y}_i + [C] \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} \dot{y}_i + [K] \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} y_i = \{F\}. \quad (8)$$

Помноживши це рівняння на деяку  $j$ -ту моду  $\{\varphi_j\}^T$ , одержимо:

$$\{\varphi_j\}^T [M] \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} \ddot{y}_i + \{\varphi_j\}^T [C] \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} \dot{y}_i + \{\varphi_j\}^T [K] \sum_{i=1}^n \{\varphi_i\} y_i = \{\varphi_j\}^T \{F\}. \quad (9)$$

Власні форми  $K$  і  $M$  є ортогональними. Якщо припустити також ортогональність  $C$ , систему рівнянь руху (9) можна подати у вигляді  $n$  окремих

$$\ddot{y}_j + 2\omega_j \xi_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = f_j, \quad (10)$$

де  $y_j$  – модальна координата;  $\omega_j$  – власна кругова частота на моді  $j$ ;  $\xi_j$  – відносна (до критичного) величина демпфування для моди  $j$ ;  $f_j$  – сила; відповідає модальній координаті,  $f_j = \{\varphi_j\}^T \{F\}$ .

Процедура модального аналізу складається з чотирьох основних кроків:

1. Побудова моделі. 2. Визначення типу аналізу, задання опцій, прикладання впливів і одержання розв'язку. 3. «Експандування» мод. 4. Аналіз результатів.

Унаслідок моделювання отримана повнорозмірна тривимірна модель верстата, яка складається з 524 254 вузлів та 235 582 гексаедричних елементів (рис. 5).

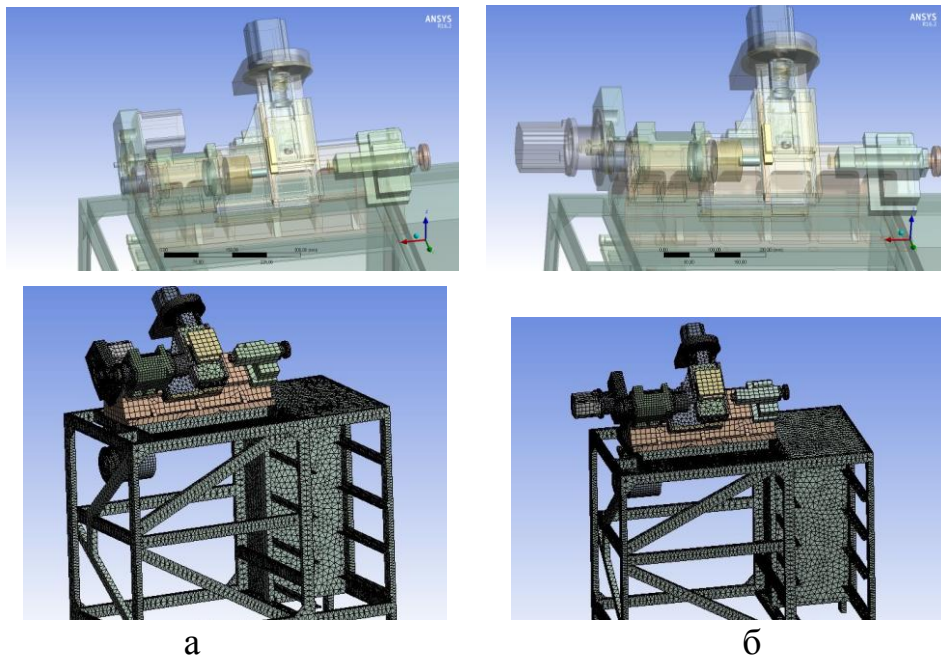
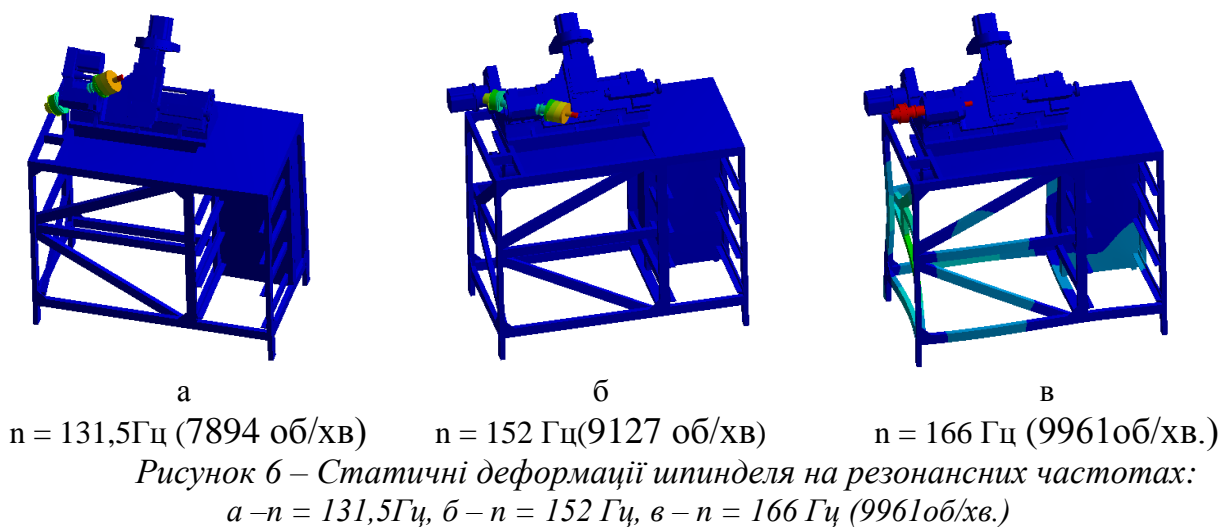


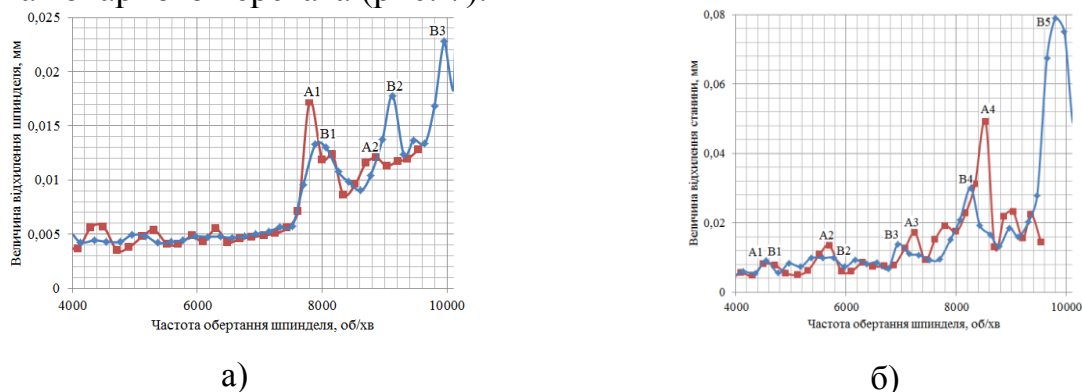
Рисунок 5 – Модель станда з різним компонуванням: а – з приводом поздовжньої подачі через редуктор, б - із прямим приводом поздовжньої подачі

Для підвищення технологічності моделі та прийнятної розрахункової трудомісткості були налаштовані контактні пари конструктивних вузлів із коефіцієнтом тертя 0,1 між фторопластовою планкою, кареткою (сталь) і напрямними (чавун). Основа верстата встановлена на регульованих гумових віброопорах із коефіцієнтом жорсткості  $E = 1 \text{ Н/мм}^2$ . Визначена жорсткість підшипника в передній бабці токарного верстата, яка становила за відповідними осями:  $X = 2\,650 \text{ Н/мм}^2$ ;  $Y = 6\,200 \text{ Н/мм}^2$ ;  $Z = 7\,900 \text{ Н/мм}^2$ .

Встановлено, що анізотропія сприйняття навантаження підшипником, обумовлена попереднім натягом ременя привода головного руху. Внаслідок модального та гармонічного аналізів верстата моделі 1700ВФ30 методом скінчених елементів були одержані його амплітудно-частотні характеристики. Встановлено вплив частоти обертання на коливання шпинделя: максимальні амплітуди коливань шпинделя виникають за  $n = 7\,800$  об/хв та  $n = 8\,870$  об/хв для верстата з положенням двигуна привода поздовжньої подачі через редуктор (рис. 6 а), а для верстату з положенням двигуна з прямим приводом поздовжньої подачі (рис. 6 б) максимальні амплітуди коливань шпинделя спостерігаються при  $n = 7\,894$  об/хв,  $n = 9\,127$  об/хв та  $n = 9\,961$  об/хв. Адекватність результатів скінчено-елементного модального аналізу перевірена експериментально. Внаслідок цього встановлено, що максимальна похибка прогнозування резонансних частот верстата становить 4,36 %.



За результатами експериментального дослідження встановлено, що частота обертання шпинделя впливає на коливання станини, шпинделя та супорта токарного верстата (рис. 7).



*Рисунок 7 – Вплив частоти обертання на амплітуду коливань шпинделя (а) та станини (б) у просторі за різних компоновань верстата*

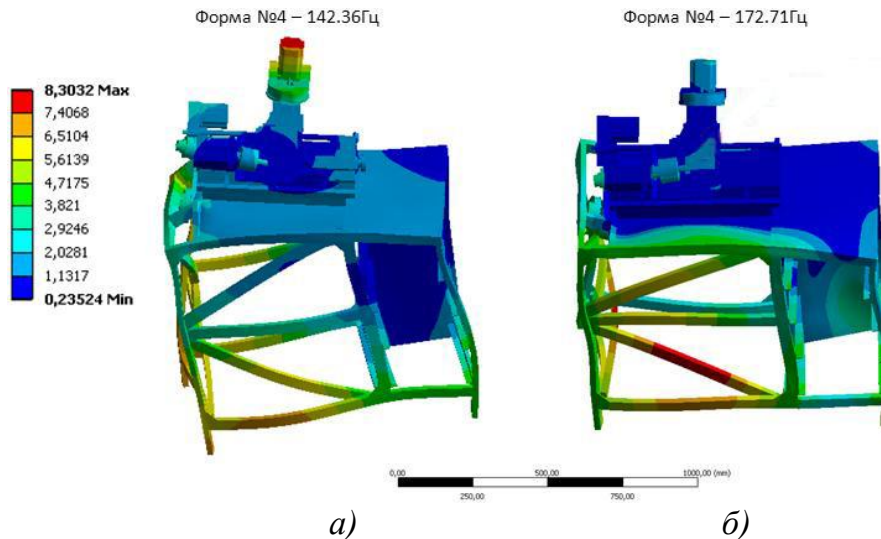


Рисунок 8 – Вплив додаткової маси на положення вузла коливань: а – статична деформація верстата із задньою бабкою, б – статична деформація верстата без задньої бабки (вага зменшена на 8 кгс).

Статичні деформації станда (рис. 8), що корелюються з амплітудою коливань відповідних вузлів, показують зміну амплітуди коливань вершини інструменту в зоні оброблення залежно від наявності задньої бабки верстата як додаткової маси (синій та голубий кольори в зоні оброблення відповідають різним значенням амплітуди коливань інструменту). За наявності задньої бабки амплітуда коливань вершини інструменту приблизно в 3–4 рази (за кольором) менша ніж за її відсутності.

Встановлено, що за наявності резонансних явищ у ТС за заданої частоти обертання здійснення точіння у вузлі коливань забезпечує зменшену амплітуду відносних вібропереміщень інструменту та шпинделя і потенційно може призводити до зменшення значення шорсткості.

Одержала теоретичне підтвердження та пояснення гіпотеза зменшення вібрацій шляхом перерозподілу мас у ТС. Доведено, що немає сенсу зменшувати вібрації у всій системі, а достатньо лише забезпечити вузол коливань у вершині інструменту. Практична цінність одержаних результатів полягає у наступному. Доведено, що для малих частот обертання шпинделя, зокрема і частот змушувальної сили, ця гіпотеза реалізується важко, оскільки для керування формами власних коливань з низькими частотами необхідні досить великі маси, тому що верстат на основі разом зі шпинделем коливаються як єдине тверде тіло. Для відносно високих частот обертання шпинделя (більше 6 000 об/хв) шляхом перерозподілу (зміщення) мас у технологічній системі можна істотно зменшувати вібрації у всій системі, оскільки навіть невеликі маси (у даному прикладі - 8 кгс) призводять до зміни форми, амплітуди і частоти власних коливань.

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження амплітуд коливань шпинделя та вершини інструменту залежно від положення основних мас верстата; значення шорсткості обробленої поверхні під час виникнення автоколивань та з модулюванням частоти обертання

шпинделя за рахунок відбудови від різання «по сліду» за частот обертання шпинделя від 400 до 6 800 об/хв.

Експериментально доведено, що максимально досяжна глибина модуляції залежно від маси обертових частин головного привода верстата та потужності двигуна істотно залежить від середньої частоти обертання шпинделя і необхідної частоти модуляції. Так, верстат 16K20T1 за частоти обертання 800 об/хв. і частоти модуляції 4 Гц максимально може змінювати свою частоту обертання на 180 об/хв, а верстат 1700ВФ30 за частот обертання шпинделя 1 900-7 000 об/хв. за частоти модуляції 5 Гц максимально змінює частоту на 50 об/хв, а за частоти модуляції 3 Гц – на 150 об/хв.

Проведення досліджень для зриву регенерації вторинних автоколивань за рахунок відбудови від різання «по сліду» на верстаті 16K20T1 під час оброблення заготовки діаметром 60 мм із сталі 40Х, твердістю 58HRC зі швидкістю різання 40 м/хв, глибиною 0,5 мм та подачею 0,2 мм за звичайного точіння значення шорсткості становило Ra1,7 мкм із візуально помітними слідами автоколивань. При ввімкненні в процесі оброблення модулятора із частотою модуляції 1 Гц, глибиною 60 об/хв шорсткість обробленої поверхні знизилася до значення Ra 0,8 мкм без слідів автоколивань на поверхні.

Проведення таких самих досліджень на верстаті 1700ВФ30 при обробленні заготовок із Д16Т на частотах 4 500-6 000 об/хв не дало однозначного результату. Під час оброблення деталей із частотою модуляції 1–5 Гц та максимально можливою глибиною модуляції, що становила 50–150 об/хв, на частотах 4 500–6 800 об/хв значення шорсткості обробленої поверхні знаходилися в межах одного класу та мала місце тенденція до її невеликого коливання (в межах похибки вимірювання профілометра П-283).

У роботі експериментально встановлено якісну залежність шорсткості обробленої поверхні від амплітуди взаємних коливань шпинделя із заготовкою і вершини леза інструменту залежно від частоти обертання шпинделя, а також визначено амплітуду коливань шпинделя та інструменту залежно від частоти обертання шпинделя на холостому ходу (рис. 9).

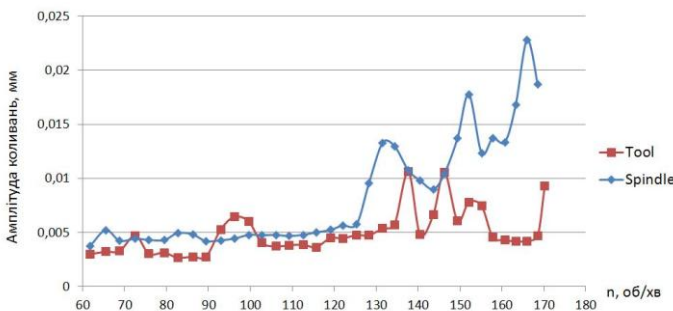
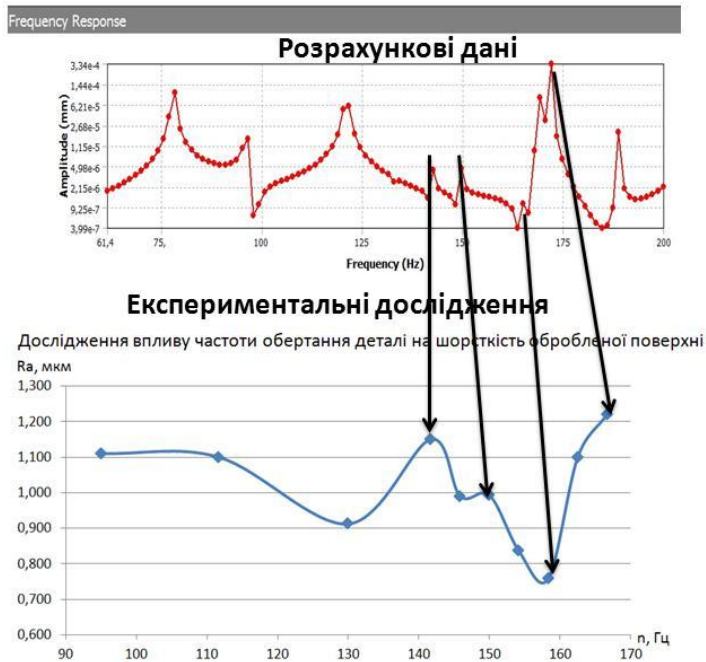


Рисунок 9 – Амплітуда коливань шпинделя та вершини інструменту залежно від частоти обертання на холостому ходу

Встановлено, що амплітуда коливань значно збільшується на резонансних частотах системи: 135, 152 та 166 Гц амплітуда становить, відповідно, 0,013, 0,017 і 0,022 мм. За проміжних значень між резонансними частотами обертання (143 та 160 Гц) амплітуда коливань зменшується до 0,009 і 0,012 мм, відповідно. Аналогічно амплітуда коливань інструменту за 138 та 146 Гц

становить близько 0,01мм, за інших частот, в тому числі й більших, близько 0,005 мм.

За допомогою скінченоелементної моделі шляхом аналізу Frequency Response програмного комплексу Ansys визначено амплітуду взаємного коливання шпинделя із заготовкою і вершини леза інструменту залежно від частоти обертання шпинделя (рис. 10), та порівняно із експериментальними дослідженнями впливу частоти обертання шпинделя за сталого режиму обробки ( $V = 500$  м/хв.,  $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,5$ мм) на шорсткість обробленої поверхні.



*Рисунок 10 – Вплив амплітуди взаємних коливань шпинделя із заготовкою і вершини леза інструменту на шорсткість обробленої поверхні за різних частот обертання шпинделя*

Із порівняння графіків бачимо, що амплітуди взаємних коливань інструменту і шпинделя та шорсткості залежно від частоти обертання шпинделя за якої відбувалося оброблення подібні. Таким

чином, можна стверджувати, що амплітуда відносних коливань шпинделя із заготовкою та вершини леза інструменту відображається на обробленій поверхні деталі як вібраційна складова шорсткості.

Для підтвердження ефекту впливу власних форм коливань системи на взаємні коливання вершини інструменту та заготовки проведено експеримент. Визначено амплітуди коливань інструменту при положеннях супорта на відстані 20 мм та 200 мм від торця шпинделя, а також на відстані 20 мм від торця шпинделя як із встановленою на станині задньою бабкою, вагою 8кг, так і без неї. Амплітуди коливань інструменту за різних частот обертання шпинделя і положень інструменту наведено на рис. 11.

Доведено, що наявність додаткової маси призводить до зміни амплітудно-частотної характеристики коливань різця стосовно шпинделя. При цьому максимуми амплітуд коливань зміщуються. Під час точіння без маси (без задньої бабки) мінімальна амплітуда коливань у фіксованому положенні різця має місце за частот 6 800 та 8 800 об/хв, за наявності маси – за частот 4 800 та 7 800 об/хв. Таким чином, змінюючи положення інструменту відносно станини, а також, встановлюючи на станину додаткову керовану масу, можна змінювати амплітуду коливань інструменту (для цього верстата в межах від 0,2 до 0,45 мкм), що відобразиться на шорсткості обробленої поверхні.



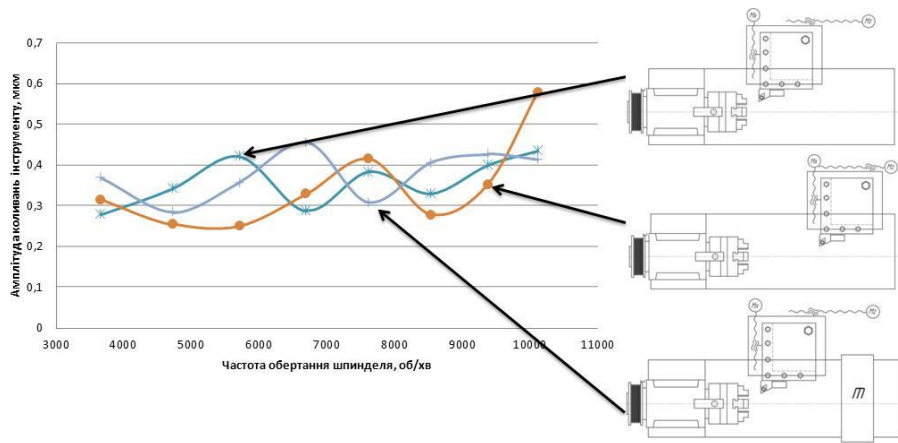


Рисунок 11 - Амплітуди коливань інструменту за різних частот обертання шпинделя і положеннях інструменту.

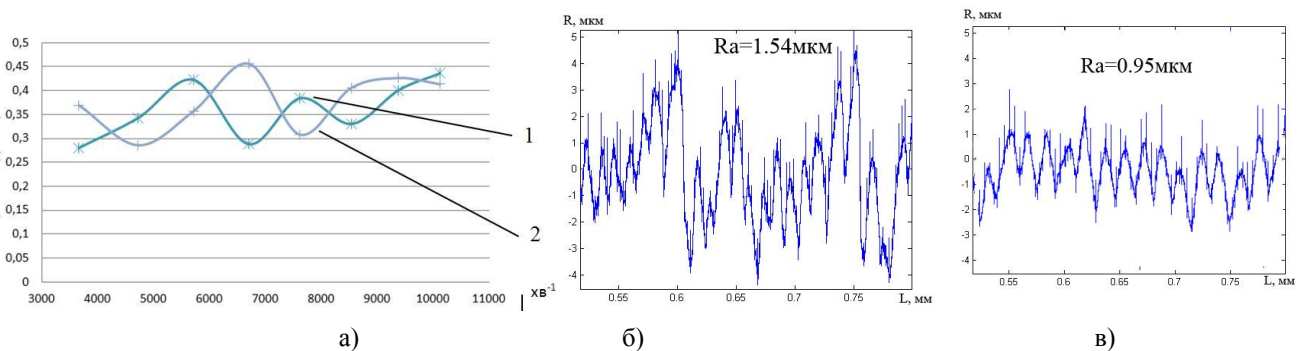


Рисунок 12 – Вплив додаткової маси на амплітуду вібропереміщення інструменту в радіальному до деталі напрямку (а) та мікропрофіль обробленої поверхні під час точіння на частоті 7 850 об/хв без додаткової маси (б) та з додатковою масою (в).

Аналогічна ситуація мала місце при обробці деталей із Д16Т діаметром 20 мм за однакового режиму обробки ( $V=500$  м/хв.,  $S=0,05$  мм/об,  $t=0,5$  мм) із встановленою задньою бабкою та без неї на частоті обертання 7 850 об/хв., що свідчить про зниження шорсткості з  $Ra$  1,54 до  $Ra$  0,95 мкм (рис. 12), а також доводить вплив власних форм коливань обробної системи на шорсткість обробленої поверхні.

**П'ятий розділ** присвячений розробленню практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу при забезпеченні шорсткості обробленої поверхні на основі визначення частот власних резонансних коливань та забезпечення мінімальних амплітуд коливань шпинделя та інструменту верстата за підвищених частот обертання шпинделя.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної галузі полягає у розробленні принципу зменшення впливу автоколивань на шорсткість обробленої поверхні за рахунок динамічного керування частотою обертання шпинделя. Запропоновано технічну інструкцію з алгоритмом динамічної зміни частоти обертання заготовки для зриву регенерації

автоколивань під час оброблення деталей малого діаметра з високими частотами обертання шпинделя, впроваджену у виробництво на ТОВ “КБ Укрспецмаш” під час виготовлення деталей торцевих ущільнень відцентрових нафтових насосів марок НК, НКВ, НПС, а саме: аксіально-рухомої втулки, що дозволило підвищити шорсткість обробленої поверхні до Ra 0,4 мкм, причому час виготовлення деталі зменшився на 12 % за рахунок виключення операції полірування поверхні, це дало економічний ефект 153,00 грн при виготовленні однієї деталі.

Одним із ефективних методів удосконалення динамічного керування коливаннями супорта верстата є метод введення додаткових дій, що дозволяє відстежити амплітуду коливань супорта за рахунок збільшення інерційних характеристик верстата та зменшення логарифмічного декременту коливань різця, що забезпечує підвищення точності обробки та шорсткості оброблюваної поверхні деталі на підвищених частотах обертання шпинделя (рис. 13).

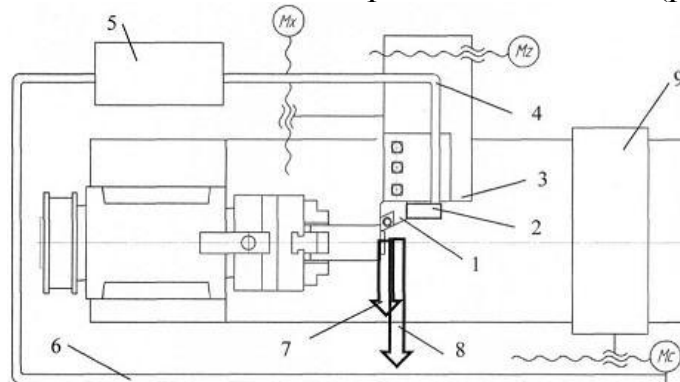


Рисунок 13 – Спосіб динамічного керування коливаннями супорта верстата. 1 – різець; 2 – датчик віброприскорення; 3 – супорт; 4 – канал зв'язку датчика з блоком керування; 5 – блок керування; 6 – канал зв'язку привода додаткової маси; 7, 8 – вектори коливання інструменту; 9 – додаткова маса

За мінімальних коливань різця за координатою X визначається мінімальна шорсткість обробленої поверхні, а наявність переміщуваної рухомої маси, яка розміщується на станині пропорційно мінімальній амплітуді коливань різця, забезпечує одержання поверхні з більш низькою шорсткістю за всією довжиною обробки деталі. Поставлена технічна задача вирішується тим, що в спосіб динамічного управління коливаннями супорта верстата, за якого реєструються коливання різця та визначається амплітуда коливань у процесі різання за довжиною оброблення деталі за допомогою датчика контролю коливань. Зміна коливань супорта регулюється шляхом переміщення додаткової маси. Датчик контролю коливань (переміщень різця) за координатою X, розміщений на різці, з'єднується з блоком керування. У процесі оброблення спочатку визначається мінімальна амплітуда коливань різця, після цього сигнал від датчика контролю коливань різця подається на привод додаткової маси, за допомогою якого вона переміщується уздовж станини на відстань, пропорційну мінімальній амплітуді коливань різця. Цей спосіб з динамічного керування коливаннями у процесі різання захищено патентом України на корисну модель (Пат. 107301 U Україна, МПК В23Q 15/12).

Не менш ефективним методом керування динамічним станом ТС є спосіб завантаження металорізального верстата прутком, який полягає в тому, що пруткову заготовку великої довжини розрізають на прутки меншої довжини за допомогою спеціального пристрою, розміщеного з боку шпинделя, протилежної зоні оброблення (рис. 14). При цьому затискають у шпинделі частину прутка бажаної довжини та відрізають залишок прутка поруч із задньою стороною шпиндельної бабки. Крім того, залишок прутка з'єднують зі штоком пристрою завантаження і використовують як шток подовженого розміру. Після останнього різання кінець залишку прутка роз'єднують зі штоком пристрою завантаження і направляють штоком до шпинделя на оброблення.

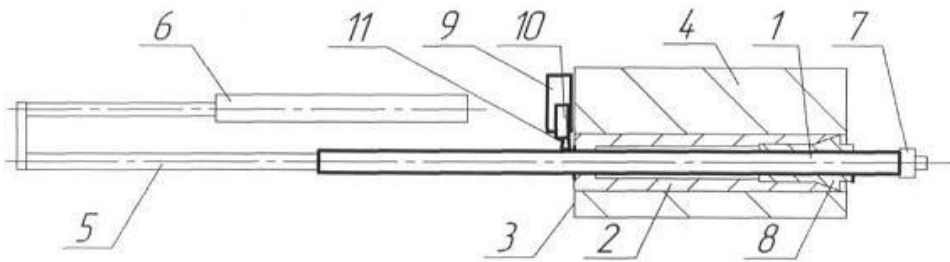


Рисунок 14 – Спосіб завантаження металорізального верстата прутком: пруток 1; шпиндель 2; задня сторона 3 шпиндельної бабки 4; шток 5 пристрою 6 для завантаження; упор 7; затискний пристрій 8; відрізний супорт 9; різцетримач 10; відрізний різець 11

Технічним завданням, на вирішення якого спрямований запропонований спосіб завантаження металорізального верстата прутком, є зменшення динамічних навантажень за підвищених частот обертання шпинделя при наявності у механізмі завантаження довгомірних прутків, із використанням самого прутка як подовженого штока для завантаження прутків зменшеної довжини та відсутність потреби в обладнанні для підготовки (нарізання) прутків потрібної довжини. Цей спосіб завантаження металорізального верстата прутковою заготовкою захищено Патентом України на корисну модель (Пат. 103688U Україна МПК (2015.01) B23B 13/00).

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене науково-практичне завдання підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу за підвищених частот обертання шпинделя для забезпечення рекомендованої виробником інструментального матеріалу швидкості різання та вимог креслення за точністю та шорсткістю поверхонь оброблюваної деталі.

1. Висунуто аргументоване припущення, що підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах можливе шляхом керування динамікою процесу за рахунок підвищення продуктивності за збільшених частот обертання шпинделя для забезпечення шорсткості обробленої поверхні вимогам креслення деталей діаметром 5–20 мм із використанням рекомендованих виробниками інструментів швидкостей різання.

2. Розроблені в роботі методика та експериментальний стенд на базі токарного верстата моделі 1700ВФ30 дозволяють: а) забезпечувати частоту обертання шпинделя до 10 000 об/хв; б) у реальному часі вимірювати миттєве значення вібропереміщень і віброприскорень шпинделя та вершини леза інструменту; в) виконувати спектральний аналіз профілограми обробленої поверхні; г) встановлювати взаємозв'язок між профілем обробленої поверхні та коливаннями шпинделя й інструменту.

3. В роботі розроблена скінченоелементна модель токарного верстата, що дозволяє шляхом модального та гармонічного аналізів його виконавчих органів визначати й прогнозувати значення власних резонансних частот та форм коливань елементів обробної технологічної системи, а також визначати їх вплив на шорсткість обробленої поверхні.

4. Експериментально встановлено, що основними джерелами коливань інструменту є автоколивання та коливання від збуджувальної сили у системі «шпиндель – пристрій – заготовка», які обмежують максимальну частоту обертання шпинделя із заготовкою збільшенням шорсткості обробленої поверхні. Доведено, що забезпечення мінімальних шорсткостей оброблених поверхонь досягається за рахунок зменшення відгуку системи на змушувальну силу в зоні різання шляхом:

- відналадки від биття, що передбачає призначення режиму різання стосовно власних резонансних частот;

- 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, за рахунок динамічного керування коливанням супорта токарного верстата збільшенням інерційних характеристик верстата та зменшенням амплітуди коливань різця, що дозволяє підвищувати точність оброблення та зменшувати шорсткість обробленої поверхні деталі на підвищених частотах обертання шпинделя.

5. Доведено, що для малих частот обертання шпинделя, зокрема і частот змушувальної сили, можливість зменшення вібрацій в обробній системі за рахунок перерозподілу мас важко реалізується, у той час, за відносно високих частот обертання шпинделя (більше ніж 6 000 об/хв) можна істотно впливати на динамічний стан технологічної системи, тому що навіть невеликі маси призводять до зміни форми і частоти власних коливань, близьких до частот коливань змушувальної сили.

6. Підвищення ефективності (продуктивності) токарного оброблення деталей малого діаметра досягається за рахунок підвищення частоти обертання заготовки із збереженням параметрів шорсткості оброблення в межах вимог креслення за рахунок:

- суміщення вузла власних форм коливань із зоною обробки (Пат. 107301U Україна, МПК В23Q 15/12);

- зменшення дисбалансу пруткової заготовки із використанням пристрою завантаження (Пат. 103688U Україна МПК (2015.01) В23В 13/00);

- динамічної зміни частоти обертання заготовки для зриву регенерації автоколивань (акт впровадження ТОВ “КБ Укрспецмаш”);
- зміни частоти обертання деталі для відналагодження від «биття».

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### *Публікації у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних.*

1. Залога В. О. Скінченоелементний аналіз динамічного стану металообробної технологічної системи / В. О. Залога, Ю. В. Шаповал, К. А. Дрофа // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – Т. 3, № 1 (29). – С. 33–39. *Здобувачем обґрунтована методика дослідження методом скінчених елементів при модальному аналізі частот власних коливань токарного верстата.*
2. Шаповал Ю. В. Стенд для исследования процесса точения с высокими частотами вращения шпинделя / Ю. В. Шаповал, Д. В. Криворучко // Журнал інженерних наук. – 2014. – Т.1, № 3. – С. А11–А18. *Здобувачем описана методика конструювання експериментального стенда для точіння з високими частотами обертання та обґрунтовані його технічні та технологічні можливості.*
3. Динамічне управління коливаннями при точінні / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, Ю. В. Шаповал, К. А. Дрофа. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – №79. – С. 100–107. *Здобувачем виконано експериментальні дослідження коливань верстата, та профілю оброблених поверхонь, моделювання технологічної системи.*

#### *Публікації у фахових виданнях.*

4. Залога В. А. Обработка деталей малых диаметров точением с высокой частотой вращения шпинделя. Проблемы и перспективы [Текст] / В. А. Залога, Р. Н. Зинченко, Ю. В. Шаповал // Сучасні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Х. : НТУ "ХПІ", 2014. – Вип. 9. – С. 50–62. *Здобувачем сформульована проблематика механічного оброблення деталей діаметром до 20 мм.*
5. Залога В.А. Современное состояние вопроса о диагностике состояния режущего инструмента при фрезеровании / В. А. Залога, Р. Н. Зинченко, Ю. В. Шаповал. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – №83. – С. 118–126. *Здобувачем виконано аналітичний огляд сучасних наукових праць присвячених питанню діагностики стану різального інструменту під час фрезерування.*
6. Мониторинг состояния режущего инструмента при точении с помощью акустического излучения: выбор информативных полос частот и показателей спектра [Текст] / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, Р. Н. Зинченко, Ю. В. Шаповал // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Машинобудування і машинознавство. – 2005. – Вип. 92. – С. 144–150. *Участь авторів рівнозначна.*
7. Залога В. О. Підвищення стабільності процесу різання шляхом зміни швидкості різання в процесі обробки / В. О. Залога, Р. М. Зінченко, Ю. В. Шаповал // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Х. : НТУ "ХПІ", 2014. – Вип. 1 (24). – С. 59-70. *Здобувачем обґрунтована можливість підвищення стабільності процесу точіння за рахунок модуляції частоти обертання шпинделя.*
8. Залога В. О. Методика оцінювання динамічного стану системи різання шляхом визначення геометричних параметрів якості обробленої поверхні / В. О. Залога, Ю. В. Шаповал // Резание и инструменты в технологических системах = Cutting & tools in technological systems : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2017. – Вип. 87. – С. 63-71. *Здобувачем розглянуто взаємозв'язок динамічного стану системи різання з геометричними параметрами якості обробленої поверхні. Запропонована модернізація профілометра моделі П-283 та розроблена методика оцінювання динамічного стану системи різання шляхом спектрального аналізу профілю обробленої поверхні*

#### *Опубліковані праці апробаційного характеру.*

9. Система технологического диагностирования инструмента / Н. Н. Коротун, Д. В. Криворучко, Р. Н. Зинченко, Ю. В. Шаповал // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета. – Сумы : СумГУ, 2004. – С. 79–80.
10. Шаповал Ю. В. Разработка стенда для исследования вибраций при точении с высокой скоростью вращения детали / Ю. В. Шаповал, Р. Н. Зинченко // Машинобудування України

очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво : тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, м. Суми, 27–31 жовтня 2014 р. / Відп. за вип. В.О. Залога. – Суми : СумДУ, 2014. – С. 106–107.

11. Залога В. А. Влияние частоты вращения шпинделя на качество обработанной поверхности при точении / В. А. Залога, Ю. В. Шаповал // *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво : тези доповідей XV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції*, 4–7 листопада 2015 року. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – С. 30-31.

12. Залога В. О. Підвищення стабільності процесу різання шляхом зміни швидкості різання в процесі обробки / В. О. Залога, Р. М. Зінченко, Ю. В. Шаповал // *Високі технології: тенденції розвитку : матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару*, 7–12 вересня 2015 р., м. Одеса. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХПІ», 2015. – С. 82-84.

13. Залога В. О. Вплив стану динамічної системи на шорсткість обробленої поверхні при точінні / В. О. Залога, Ю. В. Шаповал // *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції*, м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.: у 2-х ч. / Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2016. – Ч.1. – С. 49.

14. Серпенінов В. В. Дослідження коливань шпинделя токарного верстату моделі 1700ВФ30 залежно від частоти його обертання / В. В. Серпенінов, Ю. В. Шаповал; кер. Д.В. Криворучко // *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 14–17 квітня 2015 р.)* / Редкол.: О. Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2015. – Ч.1. – С. 43.

15. Шаповал Ю. В. Повышение качества обработки деталей малых диаметров точением с частотой вращения шпинделя более 5000 об/мин / Ю. В. Шаповал, Р. Н. Зинченко // *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції*, м. Суми, 22–25 квітня 2014 р.: у 2-х ч. / редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2014. – Ч.1. – С.43.

16. Шаповал Ю. В. Забезпечення якості механічного оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу високочастотного точіння / В. О. Залога, Ю. В. Шаповал // *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво : тези доповідей XVII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції* м. Чернігів, 2017.– С. 10–11.

***Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.***

17. Пат. 103688 У Україна, МПК В23В 13/00 (2015.01). Спосіб завантаження металорізального верстата прутком / Криворучко Д.В., Шаповал Ю.В., Коротун М.М. (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u201506325; заявл. 26.06.2015; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

18. Пат. 107301 У Україна, МПК В23Q 15/12 (2006.01). Спосіб динамічного управління коливаннями супорта верстата / Криворучко Д.В., Шаповал Ю.В., Коротун М.М. (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u201512933; заявл. 28.12.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. №10.

## АНОТАЦІЇ

**Шаповал Ю.В. Підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу з високими частотами обертання шпинделя. - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Житомирський державний технологічний університет, 2018 р.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми забезпечення якості обробленої поверхні деталей діаметром 5-20 мм. Основна ідея роботи полягає у науковому обґрунтуванні необхідності суміщення вузла власних форм коливань із зоною оброблення, що дозволяє забезпечувати шорсткість обробленої поверхні вимогам креслення при умові скорочення кількості технологічних операцій.

Отримані залежності впливу частот власних коливань вузлів верстата на шорсткість обробленої поверхні.

Отримані результати дозволяють встановлювати діапазони частот обертання шпинделя з модуляцією, що забезпечують скорочення кількості технологічних операцій за умови забезпечення шорсткості обробленої поверхні.

*Ключові слова:* процес механічного оброблення, шорсткість поверхні, токарний верстат, коливання технологічної системи, модуляція частоти обертання шпинделя.

#### Аннотация

**Шаповал Ю. В. Повышение эффективности обработки деталей на токарных станках путем управления динамикой процесса с высокими частотами вращения шпинделя.**

На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты. - Житомирский государственный технологический университет, 2018.

Диссертация посвящена решению проблемы обеспечения качества обработанной поверхности деталей диаметром 5–20 мм. Основная идея работы заключается в научном обосновании необходимости совмещения узла собственных форм колебаний с зоной обработки, что позволяет обеспечивать шероховатость обработанной поверхности требованиям чертежа при условии сокращения количества технологических операций с одновременным увеличением производительности.

Полученные зависимости влияния частот собственных колебаний станка на шероховатость обработанной поверхности позволяют осуществить выбор режимов обработки при увеличенной частоте вращения шпинделя с минимальным значением амплитуды взаимных колебаний шпинделя и инструмента.

Полученные результаты позволяют устанавливать диапазоны частот вращения шпинделя с модуляцией, которые обеспечивают сокращение количества технологических операций при условии обеспечения шероховатости обработанной поверхности, а также рациональные области применения данного метода.

Математическая зависимость, устанавливающая взаимосвязь суммарной амплитуды результирующих колебаний как разность частоты вращения шпинделя и собственной резонансной частоты дает возможность управления шероховатостью обработанной поверхности за счет отстройки от биений («Биения» явление в теории колебаний).

*Ключевые слова:* процесс механической обработки, шероховатость поверхности, токарный станок, колебания технологической системы, модуляция частоты вращения шпинделя, биения, автоколебания.

#### Summary

**Shapoval Y. V. Increase the efficiency of machining parts on the lathes by controlling the dynamics of the process with high spindle speeds.**

On the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.03.01 - processes of mechanical processing, machine tools and tools. - Zhytomyr State Technological University, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the problem of quality assurance of the processed surface of parts with a diameter of 5–20 mm. The main idea of the work is to scientifically substantiate the need to combine the site of its own forms of oscillation with the processing area, which allows to ensure the roughness of the treated surface to the requirements of the drawing provided that the number of technological operations is reduced.

The dependences of the influence of the frequencies of the internal oscillations of the university's universities on the roughness of the processed surface are obtained.

The obtained results allow to establish ranges of frequency of rotation of a spindle with modulation, which provide reduction of the number of technological operations provided that the roughness of the processed surface is ensured.

*Key words:* machining process, surface roughness, lathe, fluctuations of the technological system, modulation of the spindle rotation frequency.

Підписано до друку 20.12.2017. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №111.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.