

УДК 620.178.53

ЗЕНКІН М.А., ЛАЗЕБНИЙ В.І., ВАСИЛЕНКО І.Ю.  
Київський національний університет технологій та дизайну

### УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

**Мета.** Дослідження впливу динамічних характеристик шліфувальних верстатів на якість обробки малогабаритних валів.

**Методика.** Використаний автоматизований контроль та ідентифікація динамічних характеристик шліфувальних верстатів в системі моніторингу технологічного процесу.

**Результати.** Отримані результати експериментальних досліджень зв'язку динамічних характеристик шліфувальних верстатів і якості обробки малогабаритних валів для визначення найбільшої ефективності процесу шліфування.

**Наукова новизна.** Запропонований автоматизований контроль рівня вібрацій шліфувальних верстатів як елемент моніторингу технологічного процесу, що забезпечує отримання достовірної інформації про динамічний стан верстату, який суттєво впливає на якість обробки малогабаритних валів.

**Практична значимість.** Проведені дослідження є основою для розробки методики моніторингу процесу шліфування в рамках системи управління якістю продукції та сприяли реалізації комплексу організаційно-технічних заходів, що дозволило виключити дефекти на поверхнях кочення малогабаритних валів.

**Ключові слова:** динамічні характеристики, віброакустичні коливання верстата, запас стійкості динамічної системи, якість обробки, малогабаритні вали.

**Вступ.** Одним з найважливіших процесів фінішної обробки малогабаритних валів є шліфування на автоматизованих верстатах. До зниження якості валів призводить вплив ряд факторів, які супроводжують процес шліфування, такі як високі температури, що тягнуть стирання різальних кромek абразивних зернин шліфувального круга, сколювання різальних кромek, заповнення вільних пір металевою стружкою та ряд інших чинників [1, 2]. Якість обробки малогабаритних валів забезпечується управлінням процесами шліфування. Слід зазначити, що у процесі функціонування в автоматизованих металорізальних верстатах (МРВ) протікає безліч процесів різної швидкості: технологічні, які реалізують основну функцію верстата, коливальні та теплові, викликані внутрішніми і зовнішніми джерелами збуджень, трибологічні, пружно-деформаційні і ряд інших, що визначають реальний стан процесу обробки і устаткування [1, 2]. Важливим етапом в забезпеченні параметричної надійності МРВ є моніторинг, що включає контроль, діагностування, прогнозування та управління якістю обробки на основі аналізу результатів вимірювань визначальних параметрів технологічного процесу і обладнання [3, 4]. В якості одного з найбільш значущих елементів моніторингу розглядається контроль динамічних характеристик МРВ [5, 6].

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження динамічних характеристик шліфувальних верстатів на якість обробки малогабаритних валів.

**Результати дослідження.** Якість малогабаритних валів після операції шліфування, яке визначається макро- і мікрогеометричними параметрами точності та фізико-механічним станом поверхневого шару доріжок кочення, залежить від багатьох факторів (рис. 1), в тому числі і таких як режим різання і динамічний стан верстата. Активний контроль здійснюється засобами, вбудованими в технологічне обладнання для безпосереднього впливу на технологічний процес з метою забезпечення заданої якості продукції. Розвиток активного контролю з використанням мікропроцесорної техніки дозволяє за рахунок збільшення числа контрольованих параметрів, за якими оптимізується процес шліфування, розширити функції приладів активного контролю. Це призводить, з одного боку, до ускладнення приладів контролю, але, з іншого боку, отримується вимірювальна інформація про величину і напрямок зміни параметрів деталей і технологічного процесу, що дозволяє здійснити оперативний контроль режиму обробки та забезпечити високу якість поверхневого шару доріжок кочення малогабаритних валів. Автоматичний розподіл режимів шліфування по припуску, який здійснюється приладами активного контролю, може бути більш-менш ефективним в залежності від набору контрольованих параметрів і способів обробки інформації про процес і про результати шліфування. До числа додаткових параметрів, що контролюються слід віднести рівень вібрацій в динамічній системі (ДС) і швидкість зняття припуску. Вимірювання вібрації ДС дозволяє контролювати не тільки власне процес шліфування, та правку круга, а також скоротити час «шліфування повітря».

Для оцінки динамічного стану МРВ використовується вимір рівня віброакустичних (ВА) коливань вузлів підсистеми, які суттєво впливають на некруглість і хвилястість обробленої поверхні кочення, а також сприяють зміні структури поверхневого шару, що знижує надійність виробу.

При ідентифікації динамічного стану верстата виникає необхідність в побудові його достовірної математичної моделі. Шліфувальний верстат є складною динамічною системою (ДС), що складається з декількох підсистем, взаємодія між якими здійснюється як при різанні, так і без різання (під час холостого ходу).

У процесі шліфування взаємодіють силові і теплові процеси, які пов'язані з різанням і пластичними деформаціями металу, процеси зносу шліфувального круга і зміни його ріжучих властивостей, динамічні процеси в формотворюючій підсистемі, включаючи коливальні процеси в шпіндельних вузлах (ШВ) кола і деталі, процеси тертя, процеси в електро- і гідроприводах робочих рухів верстата, а також деякі інші процеси, вплив яких несуттєвий.

В якості математичної моделі ДС верстата доцільно розглянути передаточну функцію [7]. Її побудову передуює складання функціональної схеми ДС (рис. 2), яка найбільш доцільна з точки зору зручності подання вхідних і вихідних величин і впливів, а також організації контролю параметрів, що дозволяють оцінити динамічний стан верстата. Так, наприклад, в виробничих умовах вимірюваними є рівні коливань ШВ інструменту  $x_U(t)$  і ШВ деталі  $x_D(t)$ , що дозволяє використати їх в системі моніторингу.

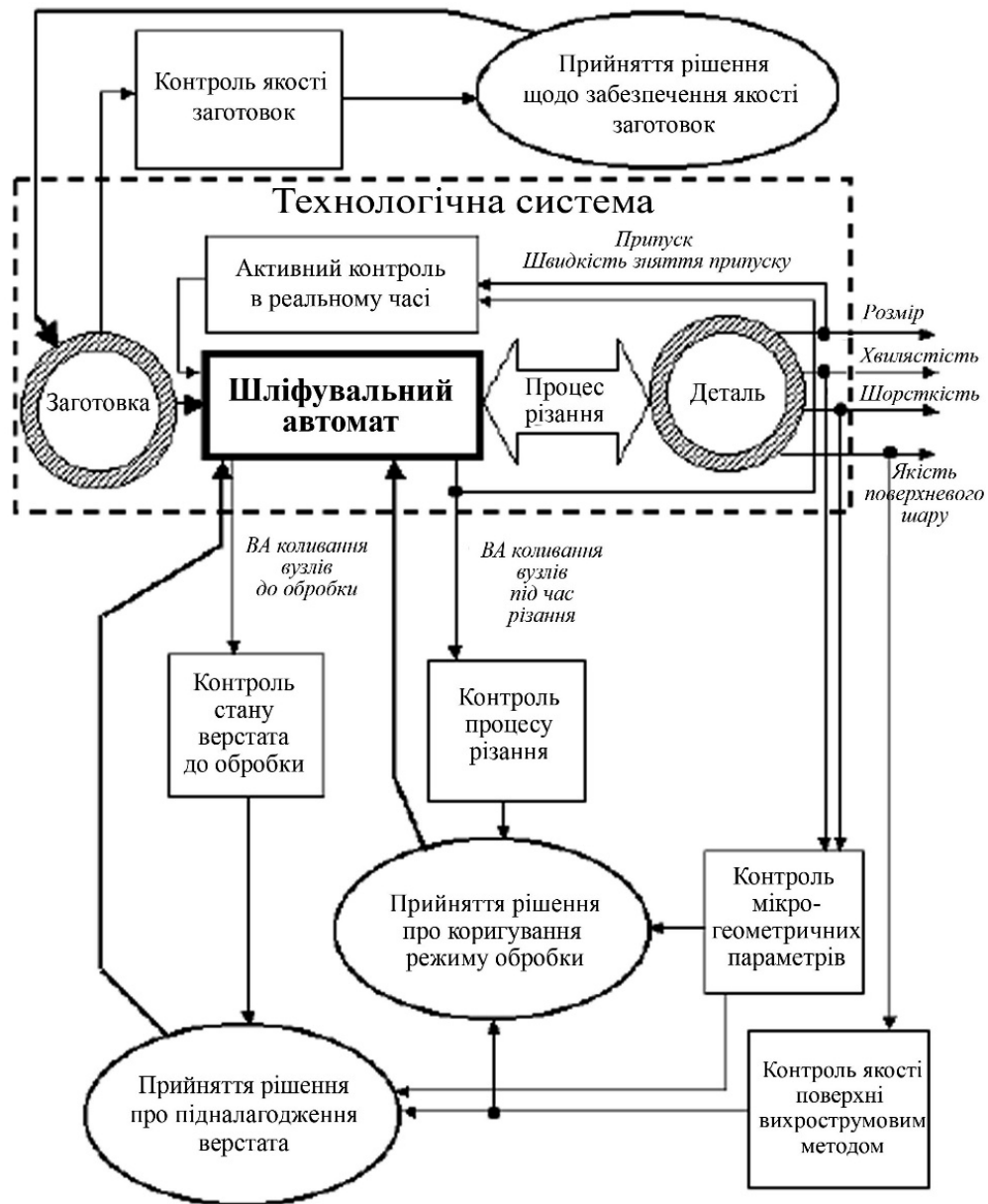


Рис. 1. Управління процесом шліфування з використанням додаткових інформаційних параметрів

При побудові моделі ДС необхідно враховувати стохастичні властивості параметрів і процесів в технологічній системі (ТС) при абразивній обробці. За регулюючий вплив на процес прийнята швидкість супорта поперечної подачі шліфувального круга  $v_c$ , а за вихідну змінну об'єкта – радіальна складова сили різання  $F_p$ .

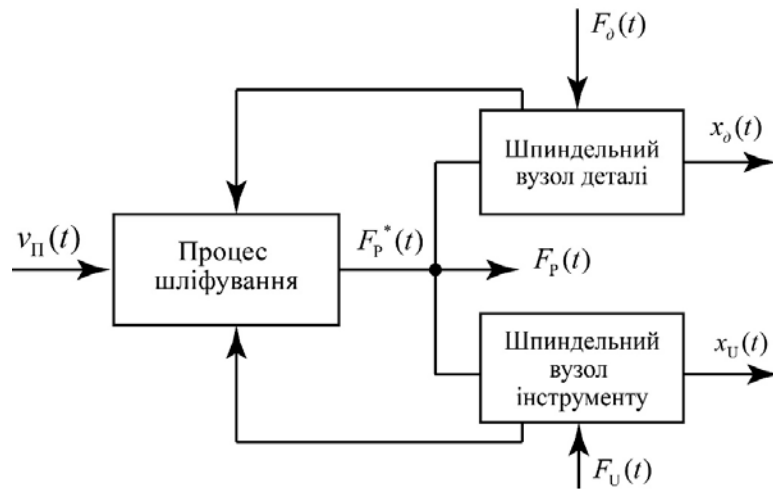


Рис. 2. Функціональна схема ДС шліфувального верстата:  $v_{п}(t)$  – швидкість подачі круга;  $F_p(t)$  – сила різання;  $F_о(t)$ ,  $F_у(t)$  – збуджуючі впливи;  $x_о(t)$ ,  $x_у(t)$  – наведені до поверхні різання зсуви ШВ деталі і ШВ інструменту

Беручи до уваги схему ДС верстата, можна зробити висновок, що пружна система складається з паралельно з'єднаних ШВ деталі і ШВ інструменту, таким чином,  $W_{yc}(p) = W_у(p) + W_д(p)$ . Тоді передаточна функція процесу різання буде мати вигляд:

$$W_p(p) = \frac{1}{p} (1 - e^{-p\beta\tau_d}) \frac{K_{рлз}}{1 + K_{рлз} (1 - e^{-p\tau_d}) [W_д(p) + W_у(p)]}, \quad (1)$$

де,  $K_{рлз}$ ,  $\beta$  – коефіцієнти, що визначають процес різання,  $\tau_d$  – час обертуту деталі.

Передаточні функції ШВ деталі  $W_д(p)$  і ШВ інструменту  $W_у(p)$  в загальному випадку мають складну структуру, яка створена сукупністю коливальних ланок. Вирази для них мають наступний вигляд:

$$W_д(p) = \sum_{i=1}^n \frac{h_{д_i}}{T_{д_i}^2 p^2 + 2\gamma_{д_i} T_{д_i} p + 1}, \quad W_у(p) = \sum_{j=1}^m \frac{h_{у_j}}{T_{у_j}^2 p^2 + 2\gamma_{у_j} T_{у_j} p + 1}, \quad (2)$$

де  $h_{д_i}$ ,  $h_{у_j}$  – коефіцієнти, що обумовлені статичної жорсткістю окремих елементів ШВ;  $T_{д_i}$ ,  $T_{у_j}$  – сталі часу, що обумовлені власними частотами окремих елементів ШВ;  $\gamma_{д_i}$ ,  $\gamma_{у_j}$  – відносні коефіцієнти демпфірування окремих елементів ШВ.

Аналіз формули (1) з урахуванням виразів (2) досить складний, тому з метою спрощення передаточної функції  $W_p(p)$  ШВ розглянемо коливальні ланки з однієї основної частотою, тоді отримаємо:

$$W_p(p) = \frac{K_{рлз} \tau_d (T_у^2 p^2 + 2\gamma_у T_у p + 1)}{(T_у^2 p^2 + 2\gamma_у T_у p + 1) + K_{рлз} p \tau_d h_д (T_у^2 p^2 + 2\gamma_у T_у p + 1) + K_{рлз} p \tau_d h_у}. \quad (3)$$

Після нехтування складовими з коефіцієнтами третього і четвертого порядку, отримуємо:

$$W_p(p) = \frac{K_{\text{РІЗ}}\tau_{\text{Д}}}{T_{\text{У}}^2 p^2 + 2[\gamma_{\text{У}} + K_{\text{РІЗ}}\tau_{\text{Д}}(h_{\text{Д}} + h_{\text{У}})]T_{\text{У}}p + 1}. \quad (4)$$

Необхідно відзначити, що реально сила різання  $F_p(t)$  є сумою детермінованої складової  $\tilde{F}_p(t)$ , яка визначається подачею круга та стохастичною складовою  $\dot{F}_p(t)$ , яка визначається сукупністю різних факторів, до числа яких відносяться нерівномірність швидкості подачі круга, нерівномірність припуску заготовки, коливання в ДС та ряд інших. Це дозволяє розглядати складову  $\dot{F}_p(t)$  як «білий шум» зі сталою спектральною щільністю  $S_0$ . Стохастичний характер процесів в ДС верстата вимагає для детального аналізу застосування відповідних методів теорії випадкових процесів, зокрема, кореляційного і спектрального аналізу. Відповідно, зазначений характер сил різання обумовлює детерміновану і стохастичну складові коливальних процесів в ДС, що визначають динамічний стан верстата.

Модель ДС для врізного шліфування, що представлена на рис. 2, найбільш зручна для подальшого аналізу з точки зору організації контролю ВА коливальних основних формоутворюючих вузлів, зокрема, ШВ деталі і ШВ інструменту (абразивного круга), які безпосередньо впливають на мікрогеометрію поверхні кочення. Вихідні вимірювані величини, якщо не враховувати впливи на ШВ деталі і ШВ інструменту, виражаються формулами:

$$x_{\text{Д}}(p) = \frac{W_{\text{Д}}(p)F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_{\text{Д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]}, \quad x_{\text{У}}(p) = \frac{W_{\text{У}}(p)F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_{\text{Д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]}. \quad (5)$$

Якщо вимірювання ВА коливальних здійснюються на опорі кільця, то вплив з боку ШВ деталі і ШВ інструменту підсумовуються, отже, маємо:

$$x_0(p) = \frac{[W_{\text{Д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_{\text{Д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]}. \quad (6)$$

Складову  $\tilde{F}_p(t)$  встановлює закономірність зняття припуску, що задається від підсистеми управління, а складову  $\dot{F}_p(t)$  визначає формування мікрогеометрії поверхні. З теорії управління відомо, що спектр сигналу на виході ДС з частотної функцією  $W(j\omega)$  пов'язаний зі спектром вхідного сигналу співвідношенням:

$$S_{\text{ВІХ}}(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_{\text{ВХ}}(\omega). \quad (7)$$

В даному випадку передбачається, що  $S_{\text{ВХ}}(\omega) = S_0$ , тоді  $S_{\text{ВІХ}}(\omega)$  цілком визначається частотної функцією ДС і, отже, цей спектр знаходиться в реєстрованому сигналі, пов'язаному з величиною  $x_0(t)$ . Передаточна функція ДС визначається з формули (6) у вигляді:

$$W_{\text{ДС}}(p) = \frac{W_{\text{Д}}(p) + W_{\text{У}}(p)}{1 + W_p(p)[W_{\text{Д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]}. \quad (8)$$

З останнього виразу після ряду спрощень отримуємо:

$$W_{\text{дс}}(p) = \frac{h_{\text{д}}T_{\text{У}}^2p^2 + 2h_{\text{д}}\gamma_{\text{У}}T_{\text{У}}p + h_{\text{д}} + h_{\text{У}}}{T_{\text{У}}^2p^2 + 2\gamma_{\text{У}}T_{\text{У}}p + 1}, \quad (9)$$

де  $\gamma = \gamma_{\text{У}} + 0,5K_{\text{РВ}}\tau_{\text{д}}(h_{\text{д}} + h_{\text{У}})T_{\text{У}}^{-1}$ .

Відповідно, вираз для  $|W(j\omega)|^2$  виходить з (9) у вигляді:

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{(h_{\text{д}} + h_{\text{У}} - h_{\text{д}}T_{\text{У}}^2\omega^2)^2 + 4h_{\text{д}}^2\gamma_{\text{У}}^2T_{\text{У}}^2\omega^2}{(1 - T_{\text{У}}^2\omega^2)^2 + 4\gamma^2T_{\text{У}}^2\omega^2}. \quad (10)$$

Моделювання на комп'ютері в середовищі MATLAB 9.0 дозволило отримати спектр процесу  $x_0(t)$  при впливі типу «білий шум».

В реальних умовах експлуатації на ДС можуть впливати збудження в різних діапазонах спектру, наприклад, низькочастотне збудження через дисбаланс кола. У цьому випадку моделювання здійснюється введенням в формулу (9) додаткової складової:

$$x_{\text{ОВ}}(p) = \frac{[W_{\text{д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]F_{\text{Р}}(p) + F_{\text{УВ}}(p)W_{\text{У}}(p)}{1 + W_{\text{Р}}(p)[W_{\text{д}}(p) + W_{\text{У}}(p)]} \quad (11)$$

Збудження через дисбаланс кола можна представити наступним чином:

$$F_{\text{В}}(t) = F_{\text{Д}} \sin \omega_k t, \quad (12)$$

де  $\omega_k$  – кутова швидкість оберту кола.

Внесок зазначеного збудження в спектр частот коливань проявляється в появі складової на частоті  $\omega_k$ , амплітуда якої залежить від величини дисбалансу.

Характер спектрів відповідає експериментальним даним, представленим зокрема в роботі [6]. Реальна ДС верстата містить велику кількість ланок, чий частоти коливань необхідно враховувати при порушенні сигналом типу «білий шум», тому що ресструючий спектр має більш складний склад. Отже, для оцінки динамічного стану верстата результати вимірювань коливань  $x_0(t)$  та  $x_{\text{ОВ}}(t)$  необхідно обробляти методами теорії випадкових процесів.

Розроблена модель дозволяє для конкретного верстата розрахувати можливий спектр коливань ДС для номінального стану з урахуванням реальних частотних характеристик ШВ деталі і ШВ інструменту, а потім порівняти його з вимірним спектром вібрацій в умовах експлуатації і на основі чисельних значень деяких функціоналів зробити висновок про динамічний стан шліфувального верстату. Вибір інформативних параметрів пов'язаний з моделлю формування ВА коливань. Для прийнятої стохастичної моделі такими параметрами можуть бути спектральні і кореляційні функції, біспектри, кепстра, моментні функції, інтегральні оцінки спектрів та кореляційних функцій.

На станції технічного обслуговування Matiz Service при аналізі якості обробки малогабаритних валів різних типів виконані вимірювання ВА коливань на круглошліфувальних

автоматах моделі ROBBI REX 1200. Для вимірювань використовувалися: два вібровимірювача ВШВ-003М2 з датчиками ДН-3, осцилограф С1-55 та комп'ютер. Вібродатчики встановлювалися за допомогою магнітних опор на елементи конструкції верстатів. Сигнали датчиків реєструвалися в режимі лінійного посилення (діапазон частот 1...4000 Гц) або на октавних фільтрах, частоти яких відповідали швидкості обертання шпинделя кола. Результати оброблялися на комп'ютері в середовищі MATLAB 9.0. Встановлено характер зміни спектра ВА коливань в процесі технологічного циклу і виявлені найбільш інформативні складові. Для підсистеми «інструмент-деталь» встановлено інформативний діапазон частот 1...2 кГц, пов'язаний з процесом шліфування валів і використовуваний для управління режимом обробки.

Крім аналізу рівня ВА коливань верстатів, проводилося дослідження хвилястості і некруглості валів на кругломірі Talyrond серії 500 після попередньої обробки на верстатах моделі ЛЗ-269 Ø 10 і після остаточної обробки на верстатах моделі SWaAGL-50.

При аналізі якості обробки валів виконані вимірювання вібрацій на чотирьох верстатах моделі SWaAGL-50. В якості інформативних характеристик використовувалися рівень віброприскорення на частоті обертання кола, загальний рівень вібрацій (ЗРВ), спектри коливань та інтегральні оцінки спектрів.

Порівняльний аналіз динамічних характеристик верстатів показав, що їх рівень досить сильно впливає на якість доріжок кочення. Дані з установки вихреструмовго контролю відображають відмінності в стані поверхневого шару малогабаритних валів з дефектом і малогабаритних валів без дефектів, і корелюють з динамічним станом верстатів.

Проведені дослідження стали основою для розробки методики моніторингу процесу шліфування в рамках системи управління якістю продукції і сприяли реалізації комплексу організаційно-технічних заходів, що дозволило практично виключити дефекти на поверхнях кочення малогабаритних валів.

**Висновки.** На підставі результатів вимірювань та ідентифікації динамічних характеристик шліфувальних верстатів можна зробити наступні висновки:

1. Автоматизований контроль рівня вібрацій шліфувальних верстатів як елемент системи моніторингу технологічного процесу забезпечує отримання достовірної інформації про динамічний стан верстатів, що суттєво впливає на якість обробки малогабаритних валів.

2. Побудована модель частотної функції ДС верстата, що враховує динамічні характеристики ШВ інструменту та ШВ деталі, дозволяє здійснити моделювання спектрів процесів на виході системи за умови впливу сили різання зі стохастичним компонентом типу «білий шум», що збуджує гармонійний вплив від дисбалансу круга.

3. Для оцінки динамічного стану доцільно використовувати як детерміновані, так і стохастичні характеристики коливань основних формуютьуючих вузлів, які найбільш чутливі до зміни їх рівня і взаємопов'язані з параметрами якості обробки малогабаритних валів: без різання – рівень вібрацій на ШВ інструменту на частоті обертання і ЗРВ при різанні.

4. Результати вимірювань в виробничих умовах ВА коливань шліфувальних автоматів і якості деталей дозволили обґрунтувати доцільність використання інформації про динамічний

стані верстатів для управління процесом різання і реалізувати комплекс заходів щодо підвищення якості обробки малогабаритних валів.

### Список використаних джерел

1. Проников А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
2. Аршанский М. М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
3. Зенкин А. С. Технология машиностроения легкой промышленности / А. С. Зенкин, Л. М. Гулько, Л. Ф. Михайленко. – К.: Вища школа, 1985. – 222 с.
4. Михелькевич В. Н. Автоматическое управление шлифованием / В. Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
5. Явленский К. Н. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем / К. Н. Явленский, А. К. Явленский. – М.: Машиностроение, 1983. – 239 с.
6. Зенкін М. А. Обґрунтування вибору зміцнюючих покриттів відповідальних деталей машин / М. А. Зенкін, І. Ю. Василенко. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2012. – №6 – С. 69-76.
7. Рутковський А. В. Регулювання залишкових напруг у покриттях / А. В. Рутковський, М. А. Зенкін, А. Б. Сорока. // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – №4 – С. 34–37.

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

ЗЕНКИН Н.А., ЛАЗЕБНЫЙ В.И., ВАСИЛЕНКО И.Ю.

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

**Цель.** Исследование влияния динамических характеристик шлифовальных станков на качество обработки малогабаритных валов.

**Методика.** Использован автоматизированный контроль и идентификация динамических характеристик шлифовальных станков в системе мониторинга технологического процесса.

**Результаты.** Полученные результаты экспериментальных исследований связи динамических характеристик шлифовальных станков и качества обработки малогабаритных валов для определения наибольшей эффективности процесса шлифования.

**Научная новизна.** Предложенный автоматизированный контроль уровня вибраций шлифовальных станков как элемент мониторинга технологического процесса, обеспечивающий получение достоверной информации о динамическом состоянии станка, который существенно влияет на качество обработки малогабаритных валов.

**Практическая значимость.** Проведенные исследования являются основой для разработки методики мониторинга процесса шлифования в рамках системы управления качеством продукции, которая способствовала реализации комплекса организационно-технических мероприятий, что позволило исключить дефекты на поверхностях качения малогабаритных валов.



**Ключевые слова:** динамические характеристики, виброакустические колебания станка, запас устойчивости динамической системы, качество обработки, малогабаритные валы.

## IMPROVEMENT AUTOMATED CONTROL OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GRINDING MACHINES

ZENKIN N., LAZEBNY V., VASILENKO I.

*Kiev National University of Technology and Design*

**Purpose.** Investigation of the effect of dynamic characteristics of grinding machines on the quality of processing of small trees.

**Methodology.** Use of automated control and identification of dynamic characteristics of grinding machines in the system monitoring process.

**Results.** The results of experimental studies of the association of dynamic characteristics of grinding machines and the quality of processing of small rolls to determine the maximum efficiency of the grinding process.

**Scientific novelty.** The proposed level of automated control grinding machines vibration as part of the monitoring process that provides reliable information on the dynamic state of the machine, which significantly affects the quality of treatment of small trees.

**Practical meaningfulness.** The studies are the basis for the development of a methodology for monitoring the grinding process of the quality management system, which has contributed to the implementation of a complex of organizational and technical measures, which allowed to eliminate defects on the surfaces of small roller shafts.

**Keywords:** *the vibroacoustic vibrations of the machine, dynamic stability margin of the system, edit the grinding wheel, the quality of processing, small roller shafts.*