

УДК 621.822.2

С. А. Мороз

Луцький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ БЕЗЦЕНТРОВО-ШЛІФОВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ФОРМУВАННЯ ХВИЛЯСТОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ**

*В статті досліджено утворення хвилястості робочих поверхонь кілець роликотішипників, яка є однією з причин виникнення шуму та вібрації в підшипникових вузлах машин і механізмів. Для встановлення закономірностей виникнення хвилястості застосовано ряд положень теорії систем. З метою аналізу, безцентрово-шліфувальну систему, з деякими спрощеннями, розглянуто як лінійну неперервну замкнуту динамічну систему. Виведено передаточну функцію системи. Розв'язок характеристичного рівняння системи дозволить виявити вплив початкової хвилястості та впливу регенерації хвилястості на годограф вектора переміщення центру деталі. В результаті встановлено закономірність зміни гармонік хвилястості в залежності від геометрії налагодження жорстких опор.*

*Ключові слова:* роликотішипник, хвилястість, жорсткі опори, кути налагодження.

*Рис. 5. Форм. 15. Літ. 5.*

С. А. Мороз

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ БЕСЦЕНТРОВО-ШЛИФОВАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ**

*В статье исследовано образование волнистости рабочих поверхностей колец роликотішипников, которая является одной из причин возникновения шума и вибрации в подшипниковых узлах машин и механизмов. Для установления закономерностей возникновения волнистости применен ряд положений теории систем. С целью анализа, бесцентрово-шлифовальную систему, с некоторыми упрощениями, рассмотрено как линейную непрерывную замкнутую динамическую систему. Выведены передаточную функцию системы. Решение характеристического уравнения системы позволило выявить влияние начальной волнистости и влияния регенерации волнистости на годограф вектора перемещения центра детали. В результате установлено закономерность изменения гармоник волнистости в зависимости от геометрии налаживания жестких опор.*

*Ключевые слова:* роликотішипник, волнистость, жесткие опоры, углы отладки.

S. A. Moroz

**THE INFLUENCE OF DYNAMIC PARAMETERS CENTRELESS GRINDING SYSTEM, THE FORMATION OF WAVINESS WORKING SURFACES OF ROLLER BEARINGS**

*The paper investigates the formation of waviness work surfaces roller rings, which is one of the causes of noise and vibration in the bearing assembly machines and mechanisms. To elucidate the origin of waviness applied the theory of series. For the purpose of analysis, centreless grinding system, with some simplifications, considered as a closed linear continuous dynamic system. Displaying transfer function of the system. Solution of the characteristic equation of the system revealed the influence of the initial waviness and influence the regeneration of waviness on the hodograph of the vector displacement of the center part. The result set harmonic waviness pattern changes depending on the geometry of establishing rigid supports.*

*Keywords:* roller, waviness, rigid supports, angles adjustment.

**Постановка задачі.** При шліфуванні доріжок кочення кілець роликотішипників формуються кінцеві макро- та мікрогеометричні параметри обробленої поверхні. Одним з таких параметрів, який впливає на експлуатаційні характеристики роликотішипника є хвилястість робочих поверхонь [1, 3, 4]. Утворення хвилястості деталі, під час шліфування, викликане, зокрема, відхиленнями величини зрізаного шару або змінами в силі шліфування, при цьому величина зрізаного шару при шліфуванні пропорційна нормальній силі шліфування. Хвилястість поверхні залежить від матеріалів деталі та шліфувального круга, продуктивності знімання припуску та відносної швидкості між деталлю та кругом. Основною змінною для аналізу шліфування у більшості випадків є шліфувальна сила (рис. 1) [2, 5].

На миттєву силу шліфування впливає початкове відхилення від круглості деталі, подача шліфувального круга, геометричні умови налагодження (кути опор) та вібрації верстата. Відомо, що не існує ідеально круглої деталі, а шліфування може збільшувати або зменшувати кінцеве значення відхилення від круглості. Протягом усього цього аналізу, кільце роликотішипника буде розглядатися з точки зору хвилястості його доріжки кочення, тобто ступеня відхилення від круглості [5].

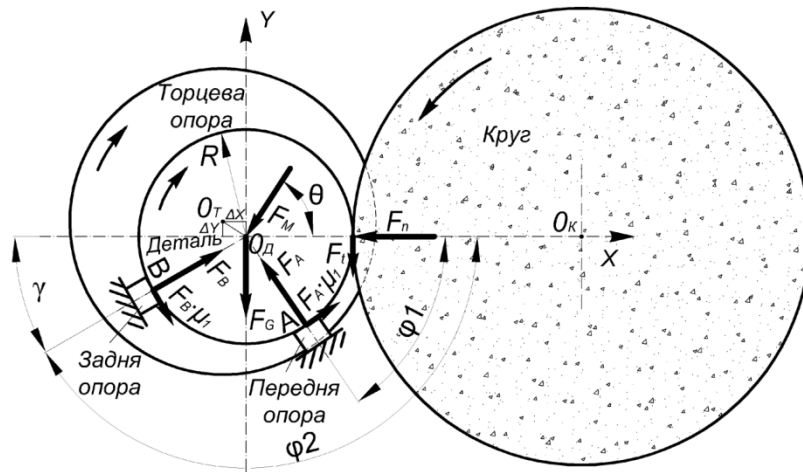


Рис. 1. Схема діючих сил при безцентровому врізному шліфуванні на жорстких опорах

**Формулювання цілей.** В даній роботі запропонована динамічна модель, яка пояснює миттєві сили, що задіяні в безцентровому шліфуванні включаючи: зміну в часі хвилястості деталі, розповсюдження тимчасових нерівностей, шліфувальну силу та вібрацію верстата. На рисунку 2 зображено блок-схему моделі безцентрового шліфування. Команда подачі поєднується з вібрацією верстата й хвилястістю шліфувального круга для формування фактичного переміщення подачі шліфувального круга. Подача шліфувального круга та геометрія налагодження двох жорстких опор в поєднанні з хвилястістю деталі дають глибину різання для шліфувального круга. Глибина різання в поєднанні з жорсткістю різання дають миттєву нормальну шліфувальну силу. В свою чергу шліфувальна сила впливає на верстат та шліфувальний круг, які по чергово впливають на фактичну подачу як вже зазначалось вище. Новоутворена хвилястість є результатом зміни фактичної глибини різання.

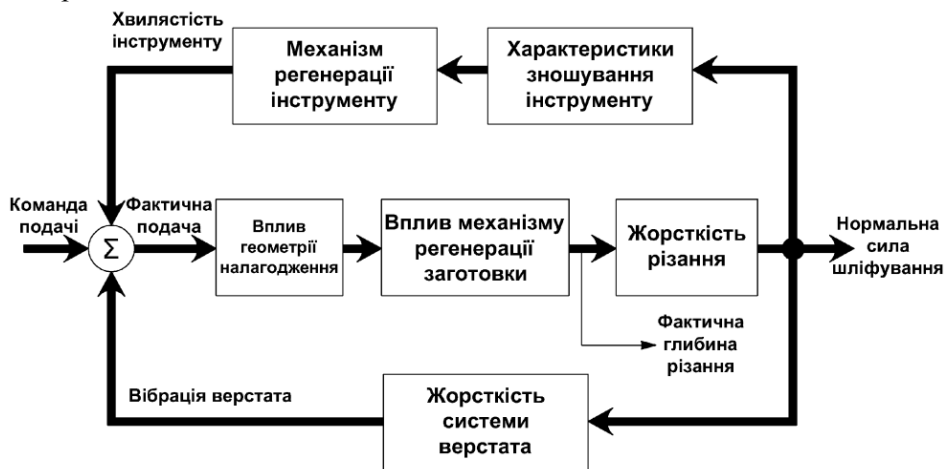


Рис. 2. Блок-схема моделі безцентрового врізного шліфування на жорстких опорах

**Основні результати дослідження.** Для аналізу безцентрово-шліфувальної системи необхідно знайти її передаточну функцію (рис. 3). Дослідження властивостей системи здійснимо використовуючи перетворення Лапласа.

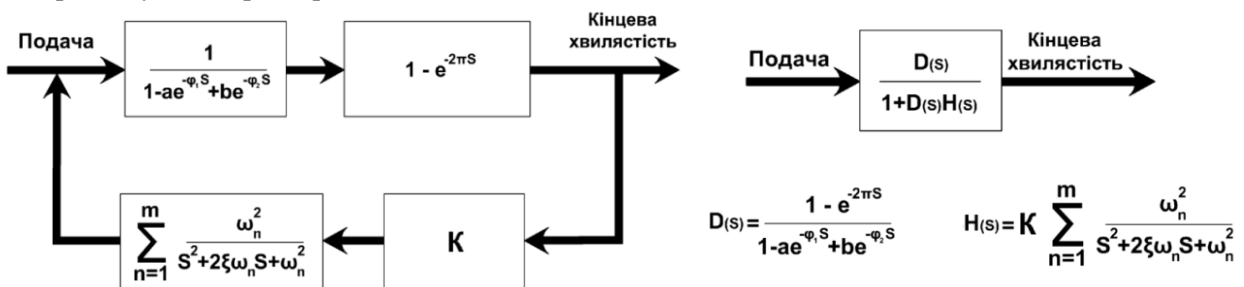


Рис. 3. Блок-схеми спрощення динамічної моделі

Щоб розв'язати характеристичне рівняння системи,

$$1 + D(s) \cdot H(s) = 0 \quad (1)$$

і знайти стійкі та нестійкі розв'язки, для відокремлення вплив геометрії та верстата, перетворимо рівняння (1), до вигляду:

$$H(s) = -1/D(s). \quad (2)$$

Для геометричного аналізу, верстат вважається нескінченно жорстким. У рівнянні (2), це виражається рівнянням

$$-1/D(s) = 0. \quad (3)$$

Хоча рівняння представлені на рисунку 3 можна вирішити за допомогою числових методів, знайдене буде графічне рішення, так як воно є більш зрозумілим і наглядним.

В області Лапласа, час затримки представлений експоненціальною функцією,  $e^{-\Omega s}$ , де  $\Omega$  - фазовий кут,  $s$  - оператор Лапласа,  $s = \sigma + j\omega$ . Досліджуючи частину рівняння (3) представляючи вплив хвилястості годографом вектора переміщення центру деталі (надалі годограф переміщення) у вигляді  $1/D(s)$ , експонентний зсув фази кутів опор  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ :

$$1 - a \cdot e^{-\varphi_1 s} + b \cdot e^{-\varphi_2 s} = 0. \quad (4)$$

Оскільки оператор Лапласа,  $s = \sigma + j\omega$ , має як дійсну так і уявну частини, експоненціали в рівнянні (4) є комплексними функціями.

Для спрощення аналізу або графічного представлення на комплексній площині функція показана в рівнянні (4) може бути розділена на її дійсну та уявну частини:

$$\text{Re} = 1 - a \cdot e^{-\sigma\varphi_1} \cos(\omega\varphi_1) + b \cdot e^{-\sigma\varphi_2} \cos(\omega\varphi_2). \quad (5)$$

$$\text{Im} = a \cdot e^{-\sigma\varphi_1} \sin(\omega\varphi_1) + b \cdot e^{-\sigma\varphi_2} \sin(\omega\varphi_2). \quad (6)$$

Аналіз стійкості є простішим, коли система знаходиться на межі стійкості, тобто при умові  $\sigma=0$ . Таким чином після перетворення рівнянь (5) та (6) маємо:

$$\text{Re} = 1 - a \cdot \cos(\omega\varphi_1) + b \cdot \cos(\omega\varphi_2). \quad (7)$$

$$\text{Im} = a \cdot \sin(\omega\varphi_1) + b \cdot \sin(\omega\varphi_2). \quad (8)$$

Для будь-якої заданої умови налагодження, кути  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  будуть не змінними, тому рівняння (7) та (8) нанесені на комплексній площині, як прості функції частоти  $\omega$  (рис. 4).

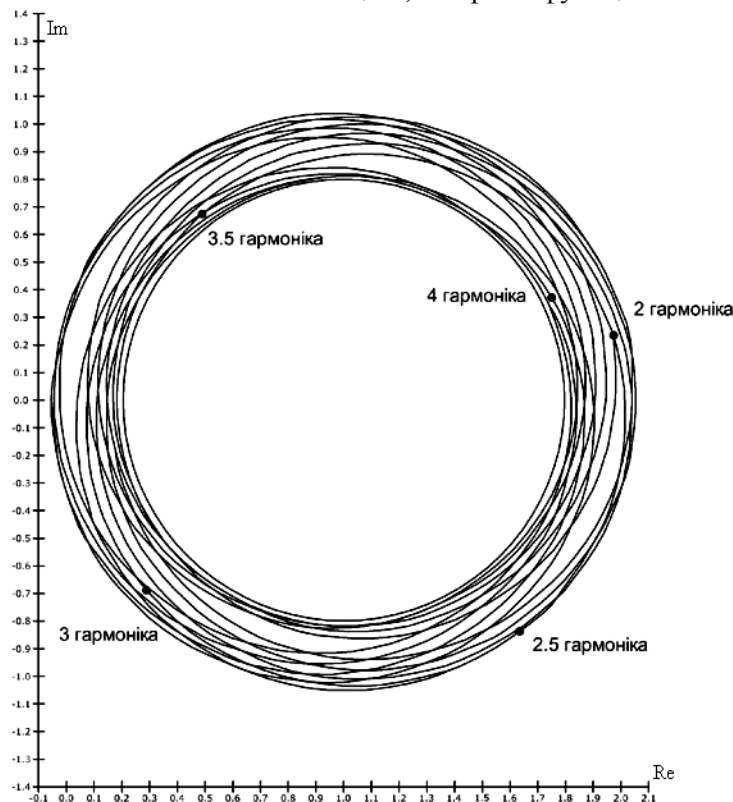


Рис. 4. Вплив хвилястості (2-4 гармоніка) на годограф вектора переміщення при заданій умові налагодження

Для різних умов налагодження, кругові тенденції показані на рисунку 3 залишилися без змін, хоча їх орієнтація змінюється незначно.

Оскільки рівняння (3) описує тільки механізм хвилястості, то він повинен бути об'єднаний з механізмом регенерації для змістовного всебічного аналізу динамічної системи.

Подальші дослідження рівнянь (5) та (6) показали, що незначні зміни в  $\sigma$  від межі стабільності  $\sigma=0$  викликають зміну величини діаметру годографа переміщення центру деталі. Зазначена особливість використана для оцінки стабільності геометрії налагодження жорстких опор.

Окрім того, встановлено важливість і тенденції факторів  $a$  та  $b$ . Зокрема,  $a$  (9) й  $b$  (10) в рівнянні 4 представляють вплив виступу на глибину різання при його проходженні через передню та задню опори, відповідно. Завдяки чому, визначено, як  $\varphi_1$  або  $\varphi_2$  впливають на нормальну складову сили шліфування, глибину різання, стабільність в зоні різання та, як наслідок, на гармоніки новоутвореної хвилястості.

$$a = \frac{\sin(\varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (9)$$

$$b = \frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (10)$$

Обертання деталі на  $360^\circ$  зумовлює механізм регенерації, що є дуже важливий, оскільки миттєва глибина різання буде залежати від величини припуску на деталі для шліфувального круга, який буде обумовлений передчасним обертовим різанням:

$$\frac{-1}{1 - e^{-2\pi s}} = 0 \quad (11)$$

Оскільки комплексний оператор Лапласа  $s$  знаходиться в знаменнику, то рівняння (11) варто помножити на величину комплексно-спряжену до знаменника для поділу на дійсну та уявну частини. Виділо дійсну та уявну частини рівняння (11):

$$\text{Re} = \frac{-1 + e^{-2\pi\sigma} \cos(2\pi\omega)}{1 + e^{-4\pi\sigma} - 2e^{-2\pi\sigma} \cos(2\pi\omega)} \quad (12)$$

$$\text{Im} = \frac{e^{-2\pi\sigma} \sin(2\pi\omega)}{1 + e^{-4\pi\sigma} - 2e^{-2\pi\sigma} \cos(2\pi\omega)} \quad (13)$$

Для геометричного аналізу на межі стійкості  $\sigma=0$ , рівняння (12) та (13) зводяться до простішого:

$$\text{Re} = \frac{-1}{2} \quad (14)$$

$$\text{Im} = \frac{\sin(2\pi n)}{2 - 2\cos(2\pi n)} \quad (15)$$

Значення рівняння (15) коливається від  $+\infty$  при цілих числах  $\omega$  (5.000, 6.000, і т.д.) та до  $-\infty$  при  $\omega$  лише трохи менших ніж цілі (5.999, 6.999 і т.д.). Як  $\sigma$  змінюється від межі стійкості  $\sigma=0$ , механізм регенерації загинається в себе та формує кола. Невеликі відхилення в  $\sigma$  істотно впливають на розмір цих кіл, які стануть важливими, коли жорсткість верстата буде вказана.

В області Лапласа, для об'єднання механізму впливу хвилястості та механізму регенерації необхідно здійснити між ними дію множення. Для графічного аналізу, механізм комбінованого впливу знайдений за допомогою множення вектора на відповідний  $s=\sigma+j\omega$ . Для цього методу, вектор від початку координат для обох механізмів хвилястості та регенерації знаходиться на тій самій частоті та  $\sigma$  (тут,  $\sigma=0$ ). У векторному множенні, значення кожного вектора множиться та кути із позитивної дійсної осі додаються.

Рисунок 5 показує елементи вибірки комбінованої роботи механізму годографа з 2 по 10 гармоніку при конкретній умові налагодження. Ці форми гіперболи годографів зосереджені навколо точки  $(-0,5;0)$  в комплексній площині та мають нескінченні асимптоти охоплюючи діапазон від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Асимптоти мають уявні компоненти, починаючи з позитивної нескінченності для цілих пронумерованих гармонік (5.000, 6.000 тощо) і закінчується в негативній нескінченності для чисел трохи менших цілих (5.999, 6.999 тощо). Характерно, що найбільш змінювана для цих годографів є кутова орієнтація асимптот. Це буде підтверджувати, що асимптоти близько  $0^\circ$  означають геометричну нестабільність.

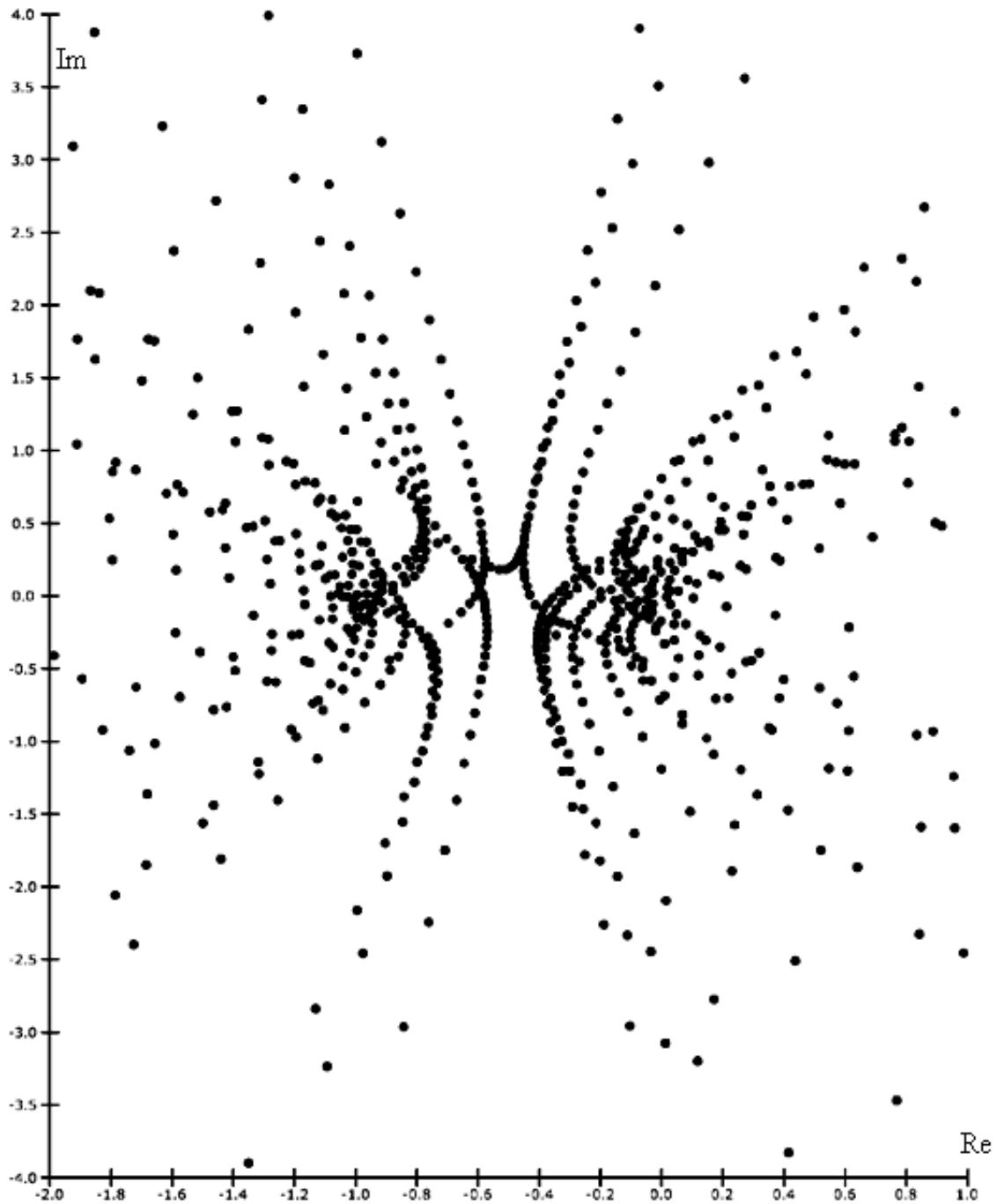


Рис. 5. Точки від об'єднаних годографів векторів для цілого ряду гармонік при заданих умовах налагодження. Кути асимптот відрізняються один від одного

**Висновки.** Використання результатів наведених досліджень дозволить забезпечити необхідні параметри хвилястості на робочих поверхнях доріжок кочення роликотішлифувальників.

Взявши за основу поданий алгоритм дослідження можна знайти загальну картину геометричної нестійкості хвилястості за звичайних умов геометрії налагодження безцентрового шліфування.

Дані, представлені в статті, базуються на аналізі динамічної безцентрово-шліфувальної системи в області Лапласа та дають можливість з високою ймовірністю прогнозування геометричної нестійкості в зоні різання при шліфуванні, діаграми на рис 4, 5 дозволяють вибрати таку геометрію налагодження шліфування на жорстких опорах, яка прогнозовано збільшує або зменшує параметри певної гармоніки хвилястості. На основі досліджень встановлено, що 14-а гармоніка є теоретично нестійкою біля  $\varphi_1=52^\circ, 78^\circ$  та  $\varphi_2=143^\circ, 168^\circ$ .

Керування хвилястістю поверхонь тіл обертання таких як доріжки кочення кілець роликотідшипників безпосередньо на операціях безцентрового шліфування є важливою умовою в забезпеченні заданих параметрів стосовно шумності та віброактивності роликотідшипника, що безпосередньо відбивається на його довговічності та надійності.

1. Дунин-Барковский И. В., Каргашова А. Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
2. Крылов И. В., Каинов Д. А. Синтез динамической модели операции шлифования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сб. тр. Межд. конф. – Волжский, 1999. – С. 230-233.
3. Пальчевський Б. О. Дослідження технологічних систем: моделювання, проектування, оптимізація: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. – Львів: СВПГ, 2001. – 231 с.
4. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. – Житомир: ТІТІ, 2001. – 612 с.
5. Чалий В. Д. Забезпечення якості робочих поверхонь кілець роликотідшипників при безцентровому врізному шліфуванні за допомогою синтезу оптимальних динамічних властивостей верстата // "Наукові нотатки" Міжвузівський збірник (за галузями знань "Машинобудування та металообробка", "Інженерна механіка", "Металургія та матеріалознавство"). Випуск 29 (жовтень, 2010), Луцьк, 2010. – С.235-239.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2014.

Рецензенти:

Заблоцький В. Ю. – к.т.н., доцент кафедри приладобудування Луцького національного технічного університету

Чалий В. Д. – к.т.н., інженер-технолог АТ «СКФ Україна» (публічне)