

УДК 621.914.1

**В.І. Марчук, І.В. Марчук, С.В. Гринюк, Л.О. Сачковська***Луцький національний технічний університет***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

*У роботі розглядаються побудова моделі процесу безцентрового шліфування роликотпідшипників. Динамічна модель технологічної системи може бути представлена лінійною аперіодичною ланкою, перехідна характеристика якої має експонентний характер, а частотні властивості проявляються в придушенні швидкозмінних складових збуджуючих впливів. При цьому, важливими технологічними параметрами являються коефіцієнти передачі і сталій часу перехідних процесів, чисельно характеризують чутливість і інерційність технологічної системи.*

*Ключові слова:* модель, шліфування, технологічна система, роликотпідшипники, процес.

**В.И. Марчук, И.В. Марчук, С.В. Гринюк, Л.О. Сачковська****МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕСЦЕНТРОВОЕ ШЛИФОВАНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕЦ РОЛИКОПОДШИПНИКИ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*В работе рассматриваются построение модели процесса бесцентрового шлифования роликотпідшипников. Динамическая модель технологической системы может быть представлена линейной аперіодическим звеном, переходная характеристика которой имеет экспоненциальный характер, а частотные свойства проявляются в подавлении быстроменяющихся составляющих возбуждающих воздействий. При этом, важными технологическими параметрами являются коэффициенты передачи и постоянной времени переходных процессов, численно характеризуют чувствительность и инерционность технологической системы.*

*Ключевые слова:* модель, шлифовки, технологическая система, роликотпідшипники, процесс

**V.I. Marchuk, I.V. Marchuk, S.V. Grinyuk, L.O. Sachkovsky****MODELING OF THE PROCESS OF THE NON-SENSOR SURFACE OF WORKING SURFACES OF ROLL-CUTTING CARPETS IN SERIOUS PRODUCTION CONDITIONS**

*The paper considers the construction of a model of the process of centrifugal polishing of roller bearings. A dynamic model of the technological system can be represented by a linear aperiodic link, whose transient characteristic is of an exponential nature, and frequency properties are manifested in suppressing fast-moving components of excitatory influences. In this case, the important technological parameters are the transmission coefficients and the time constant of the transient processes, numerically characterizing the sensitivity and inertia of the technological system.*

*Keywords:* model, grinding, technological system, roller bearings, process.

**Вступ.** Одним із основних завдань технології машинобудування є забезпечення заданої якості деталей при певному виробництві з найменшими витратами. Головним показником якості кілець роликотпідшипників є точність поверхонь кочення.[1].

Для забезпечення якості кілець, від якої в значній мірі залежить експлуатаційна надійність роликотпідшипників, при обробці на сучасних шліфувальних автоматах необхідно враховувати не тільки досить відомі методи технології машинобудування але і методи теорії автоматичного управління. Ці методи дозволяють ефективно реалізувати управління точністю за принципом зворотного зв'язку на основі приладів активного контролю, в тому числі з кількома інформаційними параметрами, а також врахувати нестационарність параметрів процесу шліфування.

Для побудови моделі процесу безцентрового шліфування доцільне використання системного підходу і модульного принципу, що дозволяє розглядати як окремі явища, що проходять в процесі оброблення заготовки, так і їх взаємодію. Використання модулів дає можливість заміни та корегування окремих блоків моделі без суттєвих змін всієї системи керування по мірі накопичення і уточнення інформації, що – до перебігу окремих процесів та явищ [3,4].

Визначення параметрів технологічного процесу, які необхідно контролювати з метою ефективного управління процесом шліфування є складною задачею, що залежить від вимог як до точності, так і до характеру взаємозв'язків між параметрами процесу шліфування та показниками якості оброблених деталей [2].

На рисунку 1 наведена схема управління точністю та продуктивністю шліфування кілець роликотпідшипників для нестационарних режимів.



Рис. 1. Схема управління точністю та продуктивністю шліфування кілець підшипників

Проведені дослідження [5,6] показують, що підвищення якості та продуктивності шліфування поверхонь кочення кілець роликпідшипників досягається за допомогою використання комбінованого управління, що включає управління точністю розміру і якістю поверхневого шару, а також управління складовими циклу обробки.

Забезпечення точності розмірів оброблених деталей на шліфувальних автоматах, як впливає з виробничої практики та огляду літературних джерел, реалізується за допомогою застосування засобів активного контролю [2]. Активний контроль виражає загальну тенденцію, властиву сучасним методам теорії управління до автоматизованого технологічного устаткування. Отримана вимірювальна інформація про величину і напрямок зміни розмірів дозволяє оптимізувати технологічний процес і забезпечити заданий рівень якості. Використання активного контролю дозволяє покращити точність обробки шляхом компенсації похибок, обумовлених зносом інструменту, тепловими та силовими деформаціями та іншими факторами. Засоби активного контролю, які реалізують управління за принципом зворотного зв'язку, дозволяють поєднати процеси обробки і вимірювання, виключаючи необхідність періодичних зупинок верстата для контролю розмірів, що різко підвищує продуктивність оброблення. Крім того, застосування активного контролю практично попереджує появу браку і істотно скорочує обсяг наступних контрольних операцій.

Для ефективного забезпечення якості шліфування робочих поверхонь роликпідшипників, крім активного контролю, при зніманні припуску доцільно використовувати такі інформаційні параметри, як швидкість знімання припуску і параметри віброакустичних (ВА) коливань вузла формоутворюючої підсистеми в процесі

різання. Зазначені параметри слід використовувати для створення додаткових зворотних зв'язків.

Кожен додатковий інформаційний параметр через контур зворотного зв'язку вносить свої корективи в вихідну програму обробки, впливаючи або на швидкість подачі, або на час виконання тієї чи іншої операції, або на структуру циклу обробки, що і дозволяє керувати якістю і продуктивністю шліфування кілець [10].

Функціональна схема системи автоматичного управління шліфуванням кілець на безцентрово-шліфувальному автоматі SASL 5D, що запропонована в роботі [7]. Наведена на рисунку 2. система адаптивного керування передбачає використання наступних інформаційних параметрів:

- величина припуску на обробленні,  $D$ ;
- швидкість знімання припуску  $V_D$ ;
- частота  $f$  та амплітуда  $A$  віброакустичних коливань процесу різання.

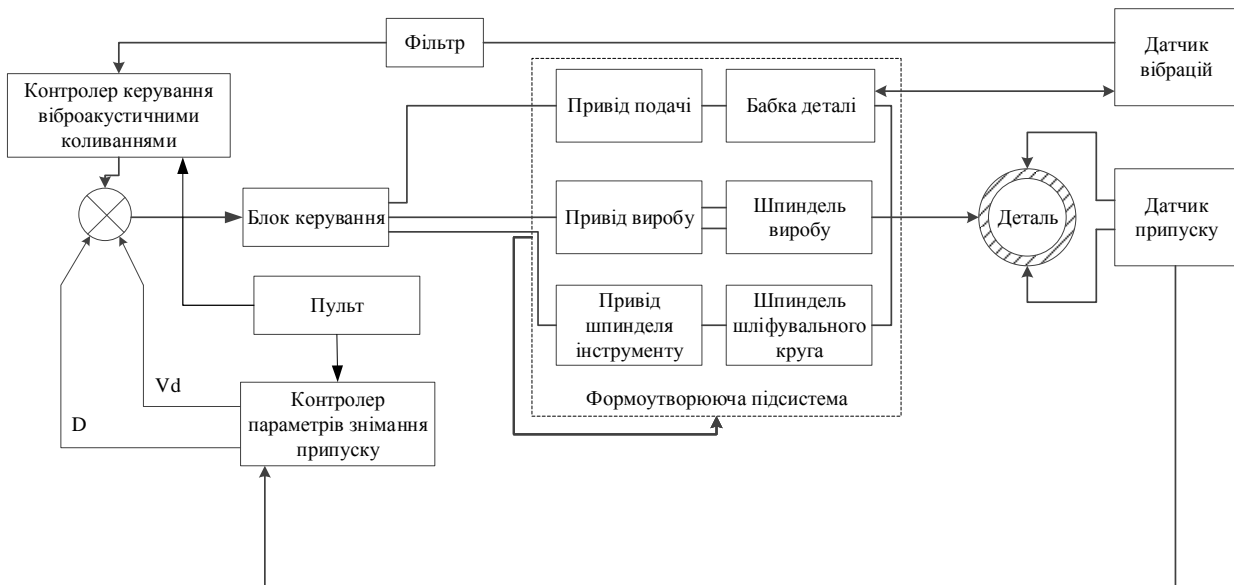


Рис. 2. Функціональна схема системи управління шліфуванням з додатковими інформаційними параметрами

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що в першому наближенні динамічна модель технологічної системи може бути представлена лінійною аперіодичною ланкою, перехідна характеристика якої має експонентний характер, а частотні властивості проявляються в придушенні швидкозмінних складових збуджуючих впливів. При цьому, важливими технологічними параметрами являються коефіцієнти передач і часові етапи перехідних процесів, які чисельно характеризують чутливість і інерційність технологічної системи [10].

Математична модель зняття припуску в перехідних режимах обробки для технологічної системи, представленої лінійною аперіодичною ланкою в найбільш загальному вигляді наведена в роботі [9]:

$$V = V_S \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_V}{k_S} \tau_S}\right) \cdot e^{-\frac{k_V}{k_S} \tau_B} \quad (1)$$

$$D = V_S \cdot \tau_S - V_S \cdot \frac{k_S}{k_V} \left(1 - e^{-\frac{k_V}{k_S} \tau_S}\right) \cdot e^{-\frac{k_V}{k_S} \tau_B} \quad (2)$$

де

$V$  – поточна швидкість знімання припуску (мм/с);

$V_S$  – швидкість подачі (мм/с);

$\tau_B$  – час виходування(поточний) (с);

$\tau_S$  – час подачі (с);

$D$  – знятий припуск (мм);

$k_S$  – жорсткість технологічної системи (мм/Н);

$k_V$  – ріжуча здатність шліфувального круга (мм/с\*Н).

В свою чергу:

$$k_S = \frac{\Delta y}{\Delta P_y}$$

де

$\Delta P_y$  – приріст радіальної сили різання;

$\Delta y$  – переміщення ріжучої крайки круга під дією радіальної сили  $\Delta P_y$ .

$$k_V = \frac{\Delta V}{\Delta P_y}$$

де

$\Delta V_D$  – приріст швидкості знімання припуску під дією приросту радіальної сили  $\Delta P_y$ .

Для розширення області застосування моделі необхідно врахувати ефект збільшення жорсткості ТС із збільшенням сили різання, а також збільшення ріжучої здатності круга зі збільшенням швидкості знімання припуску.

Так, величина пружної деформації технологічної системи [11]:

$$y = k_S \cdot P_y^\alpha, \text{ мм}$$

де  $P_y, \text{ Н}$  - нормальна складова сили різання;

$k_S$  мм/Н - жорсткість технологічної системи;

$\alpha < 1$  - показник степеня.

У свою чергу, нормальна складова сили різання:

$$P_y = k_v \cdot V^\beta$$

де  $V, \text{ мм/с}$  - швидкість знімання припуску;

$k_v, \text{ мм/с*Н}$  - ріжуча здатність круга;

$\beta < 1$  - показник степеня.

Для побудови математичної моделі шліфування в нестационарному режимі необхідно також визначити залежності або встановити обмеження, що пов'язані з нерівномірністю припуску.

Сила різання є степеневою функцією глибини шліфування і одночасно залежить від ширини шліфування, тобто. від нерівномірності припуску в поздовжньому перетині деталі. Передбачається також, що амплітуда ВА коливаль, які генеруються різанням, пропорційна ширині шліфування, а амплітуда обвідної сигналу датчика поточного припуску пропорційна нерівномірності припуску в поперечному перерізі деталі. Модель передбачає обмеження мінімального значення амплітуди ВА коливаль і максимальної амплітуди обвідної сигналу датчика поточного припуску.

Модель технологічної системи представлена у вигляді послідовності експонціальних функцій з різними сталими часу, що залежать від миттєвих значень ріжучої здатності шліфувального круга і жорсткості технологічної системи, при цьому мінливість припуску є обмеженням застосування моделі і контролюється за амплітудою ВА коливаль і за амплітудою обвідної сигналу датчика поточного припуску.

Модель дозволяє розрахувати параметри перехідних режимів обробки, що виникають при включенні і виключенні поперечної подачі, і їх нестационарність, тобто залежність від умов обробки кожної деталі.

Виходячи з того, що сила різання  $P_y$  врівноважується пружною системою верстата, запишемо:

$$k_v \cdot V^\beta = -\left(\frac{y}{k_S}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

або в диференціальній формі:

$$k_y \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right)^\beta + \left(\frac{y}{k_S}\right)^{\frac{1}{\alpha}} = 0, \quad (4)$$

Рівняння (4) має розв'язок в загальному вигляді, однак коефіцієнти і показники, що входять до рівняння, можуть змінюватися в великих інтервалах, а їх експериментальне визначення в виробничих умовах ускладнене, тому пропонується наступна експериментально - аналітична модель.

Для окремого досить малого інтервалу перехідного процесу покладемо:  $k_s = \text{const}$ ,  $k_v = \text{const}$ . Припустимо, також, що  $\alpha = \beta = 1$ . Тоді, для шліфування за рахунок накопиченого в ТС пружного натягу:

$$k_v V = -\frac{y}{k_s} \quad (5)$$

або в диференціальній формі:

$$k_v \frac{dt}{d\tau} + \frac{y}{k_s} = 0. \quad (6)$$

Звідси, швидкість зміни пружної деформації  $V_y$ :

$$V_y = V_b \cdot \exp\left(-\frac{k_v}{k_s} \cdot \tau_b\right) \quad (7)$$

де  $V_b$  - швидкість знімання припуску на початок виходжування.

Величина пружної деформації:

$$y = \int V_b \cdot \exp\left(-\frac{k_v}{k_s} \cdot \tau_b\right) d\tau = V_b \cdot \frac{k_s}{k_v} \cdot \exp\left(-\frac{k_v}{k_s} \cdot \tau_b\right) \quad (8)$$

Поточна величина припуску при виходжуванні:

$$D = D_b - \int V \cdot d\tau = D_b - \int V_b \cdot \exp\left(-\frac{k_v}{k_s} \cdot \tau\right) d\tau = D_0 - V_b \cdot \frac{k_s}{k_v} \cdot \exp\left(-\frac{k_v}{k_s} \cdot \tau\right) \quad (9)$$

де  $D, D_b$  - поточний і початковий припуск виходжування.

Вирази (5 - 9) справедливі для окремих, досить коротких інтервалів часу, коли припущення про сталість  $k_s, k_v$  - правильне. Уявімо реальний перехідний процес як ряд ділянок експонент, для яких  $\frac{k_s}{k_v} = f(V, \Delta D)$ , де  $\Delta D = D_0 - D$  - припуск, знятий за час шліфування. Оскільки  $k_s, k_v$  явно залежать від умов шліфування, розглянемо спосіб їх експериментального визначення. Відзначимо, що в виразах (5 - 9)  $k_s, k_v$  беруть участь в вигляді співвідношення  $\frac{k_v}{k_s}$ . Позначимо  $k_p = \frac{k_s}{k_v}$

Ця величина має розмірність часу. За виразом (8) для  $\tau \rightarrow \infty$ :

$$y = V_b \cdot k_s \cdot k_p = \frac{y}{V_b}$$

причому величина швидкості зняття припуску  $V_b$  може бути прийнята рівною подачі  $V_s$ , яка відома, а величина пружною деформації  $y$  може бути визначена як припуск, що знімається при досить тривалому виходжуванні (відраховується за шкалою приладу активного контролю). Варіюючи швидкість подачі  $V_s$  і знімання припуску  $\Delta D$ , отримаємо масив даних для визначення функціональної залежності:

$$k_p = f(V_s, \Delta D) \quad (10)$$

Функціональна залежність сталої часу ділянки перехідного процесу від швидкості знімання припуску представимо у вигляді:

$$k_p = k_{p0} \cdot (1 + a \cdot \Delta D) / (1 + b \cdot V^\alpha) \quad (11)$$

де  $k_{p0}$  - стала часу при нульовій швидкості знімання припуску.

На підставі рівнянь 7 - 11 складемо набір рівнянь для опису однієї короткотривалої ділянки нестационарного процесу.

Для інтервалу часу  $(\tau_{ik} - \tau_{in})$  запишемо:

$$V_{ik} = V_s - (V_s - V_{in}) \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{ik} - \tau_{in}}{k_p}\right); \quad (12)$$

$$k_p = k_{p0} \cdot \frac{(1 + a \cdot \Delta D)}{(1 + b \cdot V^\alpha)},$$

$$Y = V \cdot k_p, \quad (13)$$

$$D = D_0 - V_s \cdot \tau_s + Y. \quad (14)$$

З огляду на те, що енергія, яка витрачається на утримання пружно деформованого стану технологічної системи і енергія витрачена на теплоутворення в зоні різання тісно пов'язані, для запобігання термічних дефектів оброблюваної поверхності умову переходу від шліфування з подачею до виходжування запишемо:

$$D_b = Y - Y_{пр}. \quad (15)$$

де  $D_b$  - припуск на виходжування,

$Y_{пр}$  - пружна деформація технологічної системи до моменту припинення оброблення (відведення круга).

Умова (15) сприяє також стабілізації швидкості знімання припуску в кінці обробки, що в свою чергу стабілізує розмірну точність і шорсткість оброблених поверхонь.

**Висновок.** Рівняння 11 - 14 можуть використовуватися для чисельного моделювання різних циклів шліфування при розробці технологічних процесів, а також для формування аналогових або цифрових моделей технологічних систем в засобах автоматизації, керуючих розподілом режимів шліфування по припуску на обробку.

Викладенні елементи методики моделювання процесу шліфування використанні при розробці системи технологічної підготовки шліфувальних операцій, а також для розроблення алгоритма функціонування адаптивної системи керування шліфуванням.

#### Інформаційні джерела:

1. Бродский Б.М., Черневский А.Л., Алферов А.И. Совершенствование технологии финишной обработки колец подшипников: Обзор. - М.: ЦНИИ-ТЭИавтопром, 1990. - 66 с.
2. Воронцов Л.Н., Корндорф СФ. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1988. - 280 с.
3. Марчук В.И. Вплив технологічних чинників на експлуатаційні характеристики роликотолішпників // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка") – Луцьк: ЛДТУ, 2003. Вип. 12. – С. 179-184.
4. Марчук В.И., Назарук А.Я. Имитационное моделирование объектов механосборочного производства с помощью ЭВМ // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 4-й Международной научно-технической конференции, 23-24 октября 2001.- Харьков: ХНПК «ФЭД», 206,001 г. – С.197-204
5. Марчук В.І., Денисюк В.Ю. Моделювання зв'язків багато-інструментальних технологічних систем // Прогрессивные технологии в машиностроении /Технология – 2000 /: Материалы 15-й ежегодной международной научно-технической конференции, 18-20 апреля 2000г., г. Одесса. – Киев: АТМ України, 2000. – С. 155 – 156.
6. Марчук В.І. Модульно-функціональний синтез механоскладальних систем з позицій уніфікації // Новые технологии в машино- приборостроении и на транспорте: Материалы междунар. науч.-техн. конф., 10-14 сент. 2001.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2001.-352 с.
7. Марчук В.І., Марчук С.В., Раванець Л.М. Моделювання динамічних процесів операцій безцентрового шліфування поверхонь обертання // Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві. Випуск 1(2): зб. наукових праць – О.: АО Бахва, 2013 – с.154 – 160.
8. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Издательство Саратовского университета, 1979. – 232 с.
9. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. - М.: Машиностроение, 1982. - 208 с.
10. Тверской М.М., Терехин В.Н., Манохин Ю.И. Повышение эффективности технологических операций путем оптимального управления режимами резания // Автоматизация технологических процессов в машиностроении: Сб.ст. - Свердловск: УПИ, 1978. - С. 75-78.
11. Якимов О.В., Новиков Ф.В. Високопродуктивне шліфування. – К.: ІНТМ, 1995. – 180с.

Стаття надійшла до редакції 05.05.2019