

**УДК 621.822:681.2:369.64**

**С.В. Марчук,**  
аспірант, Луцький  
національний  
технічний  
університет  
e-mail: nfo@kptm.lutsk.ua

**Л.М. Равенець,**  
аспірант, Луцький  
національний  
технічний  
університет  
e-mail:  
vlar21@mail.ru

**В.І. Марчук,**  
д.т.н., професор,  
Луцький  
національний  
технічний  
університет  
e-mail:  
confkptm@gmail.com



## **МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОПЕРАЦІЙ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ**

*С.В. Марчук, Л.М. Равенець, В.І. Марчук.*  
Викладається підхід до математичного моделювання динамічних процесів в зоні різання під час безцентрового шліфування поверхонь обертання. Розглядається механізм збудження періодичних коливань в зоні різання для визначення умов безрезонансного шліфування

*С.В. Марчук, Л.М. Равенець, В.І. Марчук.*  
Introduced an approach to the mathematical design of fluctuations motions of grinding circle and purveyance during the centerless grinding the surfaces of rotation. Described the mechanism of excitation of periodic fluctuations in the cutting zone for providing the terms of the resonant grinding.

**Вступ.** Під час абразивного оброблення поверхонь обертання деталей роликотідшипників виникає проблема технологічного забезпечення й стабілізації параметрів якості шліфованих поверхонь. Всі параметри, що характеризують якість поверхневого шару поділяють на дві групи, геометричні та фізико-механічні [1].

В даній роботі розглядаються особливості технологічного забезпечення геометричних параметрів якості, які складаються з мікрогеометричних – параметри шорсткості та хвилястості поверхні і макрогеометричних- точність лінійних, діаметральних та кутових розмірів поверхонь, відхилення форми (гранність).

Попередніми дослідженнями [2,3] встановлено, що на мікро- та макрогеометричні параметри шліфованих поверхонь обертання впливають багато технологічних, конструктивних, кінематичних та зовнішніх чинників основними з яких є характеристика різального інструменту; режими шліфування; жорсткість технологічної системи ВПД (верстат-приспосіблення-інструмент-деталь); кінематичні особливості шліфувального верстата; температурні деформації; збуджуючі коливання та інші. Оскільки, вплив більшості з перерахованих чинників на процес формоутворення поверхонь на операціях механічного оброблення в більшій чи меншій мірі описаний в технічній літературі, а коливні процеси технологічних систем відрізняються великим спектром конструктивно-технологічних особливостей,

широкою палітрою причин, що їх породжують, то проблема моделювання динаміки формоутворення під час механічного оброблення деталей є актуальною і важливою для прогнозування й стабілізації геометричних параметрів якості поверхонь, що обробляються.

Професором Якімовим О.В. в роботі [4] встановлено, що на параметри хвилястості та шорсткості спричиняють вирішальний вплив структура, твердість та зернистість шліфувального круга, а також коливання деталі та інструменту, що залежать від режимів різання, жорсткості технологічної системи ВПД, особливостей кінематики верстата, схеми шліфування, тощо. З іншої сторони відомо, що параметри коливань в зоні шліфування мають безпосередній зв'язок з параметрами хвилястості, відхилення форми та точності шліфованих поверхонь. В цьому зв'язку слід зазначити, що прогнозуючи параметри коливання шліфувальної системи інструмент-деталь можливо встановити шлях до прогнозування параметрів мікро- та мікрогеометрії шліфованої поверхні.

**Матеріал і результати дослідження.** Для того, щоб отримати математичний опис періодичного коливного руху інструмента та деталі під час шліфування та встановити умови стійкості руху різання в сенсі виникнення цих коливань, скористаємось основними положеннями сучасної теорії коливань.

Для застосування отриманих загальних рівнянь до встановлення різноманітних випадків виникнення вібрацій під час різання, необхідно експериментальним шляхом знайти кілька параметрів, що мають місце в даних рівняннях. Але й до знаходження даних параметрів висновки з отриманих рівнянь можуть бути використані для визначення умов стійкості системи (в сенсі збудження вібрацій), а отже, і способів їх запобігання.

В якості початкового математичного опису коливного руху, що нас цікавить, можна прийняти загальну форму диференціального рівняння системи із зосередженими параметрами за умови наявності сил, що підтримують коливання, і сил опору. Прийнемо правило знаків і позначення у відповідності з рис. 1 .

Напишемо рівняння для коливань заготовки в радіальному напрямку за умови встановленої жорсткості шліфувального верстата, рівняння [1] (індекс біля параметрів  $m, \beta, k$  опущений):

$$m\ddot{y}_u + \beta\dot{y}_u + ky_u = \Delta_1 P_y + \Delta_2 P_y + \Delta_3 P_y \quad (1)$$

$$\text{Рівняння [1]} \quad m_{uy}\ddot{y}_u + \beta_{uy}\dot{y}_u + k_{uy}y_u = \varphi_y(\dot{y}_0, y_0) + Q_y(x)$$

Розділимо дві частини рівняння на  $m$ , підставимо замість позначень окремих сил  $\Delta_1 P_y, \Delta_2 P_y, \Delta_3 P_y$  їх вирази.

Вираз змінної сили, яка залежить від взаємодії деталі і шліфувального круга:

$$\Delta_1 P_y = a_1 e^{bvv} (e^{-b\dot{y}_\sigma} - 1);$$

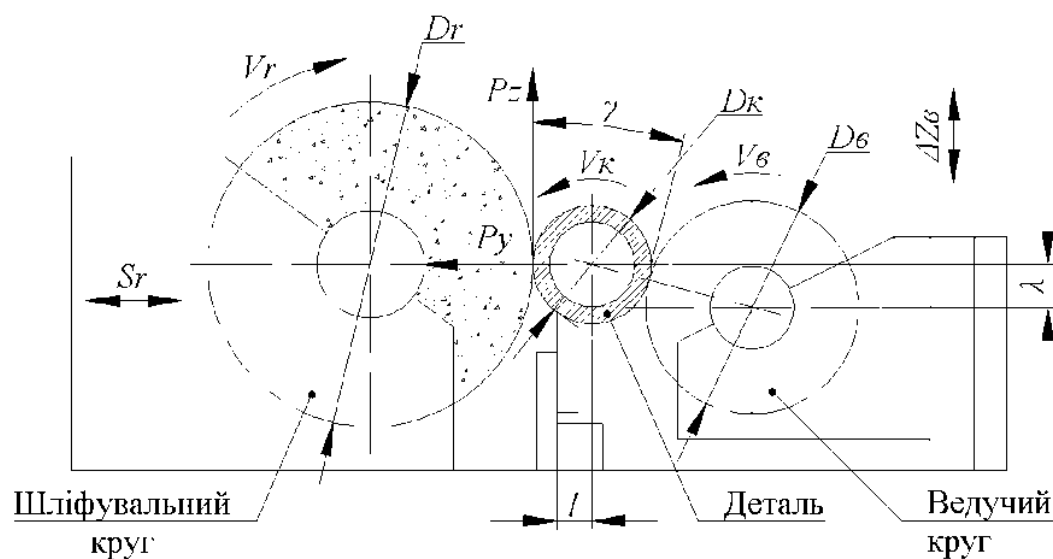


Рис. 1. Схема безцентрового шліфування зовнішнього кільця роликотішлипника на автоматі SASL 5D

Змінні сили різання що залежать від затуплення інструменту визначаємо за формулами:

$$\Delta_2 P_y = h_2 e^j (e^{-i\psi_0} - 1);$$

$$\Delta_2 P_y = P_y \left[ \frac{1}{t} + \frac{0,75}{s} \left( \frac{x_0^1}{y_0^1} \right) \right] y_0^1 = P_y \frac{y_0^1}{\Lambda}$$

і напишемо диференціальне рівняння в кінцевому вигляді (замінивши  $\frac{a_1}{m} = a$ ;  $\frac{h_2}{m} = h$ ):

$$\ddot{y}_u + 2n\dot{y}_u + \omega_0^2 y_u = a e^{bvv} (e^{-by_0} - 1) + h e^j (e^{-i\psi_0} - 1) + \frac{P_y}{m} \cdot \frac{y_0^1}{\Lambda} \quad (2)$$

Виразимо величину  $y_0^1$  через величину  $y_0$ :

$$y_0^1 = 2A_0 \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left( \omega - \frac{\varphi}{2} \right); y_0 = A_0 \sin \varphi \tau \text{ и } \dot{y}_0 = A_0 \omega \cos \omega \quad (3)$$

Розкриваючи  $\cos$  різниці кутів і користуючись виразом для  $\dot{y}_0$  и  $y_0$ , отримаємо:

$$y_0^1 = \frac{\sin \varphi}{\omega} \dot{y}_0 + 2 \left( \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) y_0 \quad (4)$$

У розглянутому випадку нас цікавить лише основна гармоніка коливань системи виробу, тому наближено відношення  $\frac{x_p}{y_u}$  можна вважати постійним (так як на систему шліфувальний круг - заготовка діють одні і ті ж змінні сили).

Позначивши це відношення через  $k_y - 1$ , можемо записати:  $y_0 = k_y y_u$  и  $\dot{y}_0 = k_y \dot{y}_u$ . Користуючись виведеними виразами, ми можемо переписати загальне диференціальне рівняння (2) таким чином:

$$\ddot{y}_u + 2n\dot{y}_u + \omega_0^2 y_u = a e^{bvv} (e^{-k_y b \dot{y}_u} - 1) + k e^j (e^{-k_y i \dot{y}_u} - 1) + \frac{F_{ye}}{m \Delta} \left( \frac{\sin \varphi \cdot k_y}{\omega} \dot{y}_u + 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cdot k_y y_u \right) \quad (5)$$

Колівальні системи під час роботи на різних кругло-шліфувальних верстатах можуть бути надзвичайно різноманітні за пружним і іншими властивостями внаслідок різних конструкцій і розмірів верстатів, заготовок і інструментів, різних способів кріплення заготовок і т. п.

Крім того, вигляд інструментального налагодження шліфувальної операції може бути дуже різноманітним за схемою різання, типом шліфувального інструменту (суцільний чи переривчастий круг), властивостей матеріалу заготовки, твердості та структури шліфувального круга ступеня точності оброблення. Внаслідок цього в рівнянні (5) за одних умов будуть мати вирішальне значення для коливного процесу одні сили, за інших - інші сили.

Може статися, що в окремих випадках деякі види діючих сил будуть навіть зовсім відсутні або будуть настільки незначні, що ними можна знехтувати.

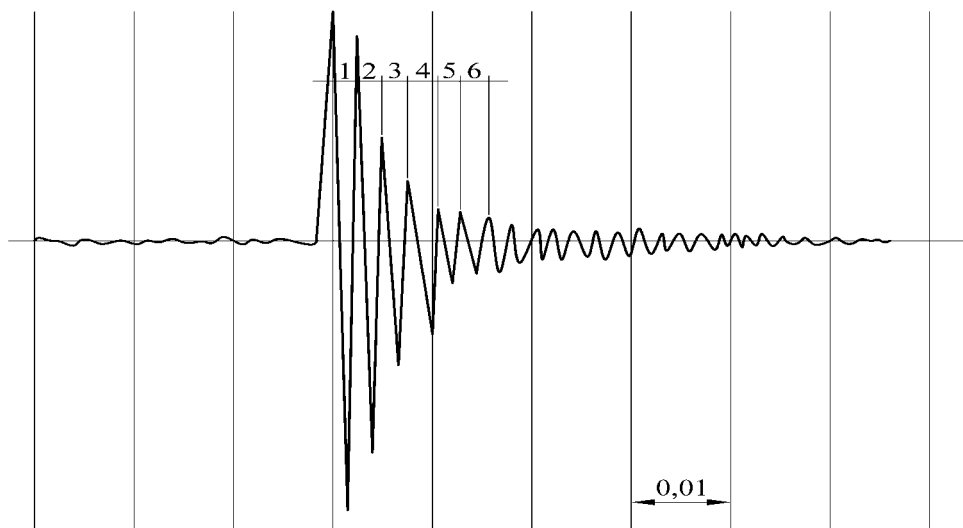
Рівняння (5) дозволяє зробити вже деякі висновки. Всі сили, що діють на систему і що можуть впливати на коливний рух, повністю визначаються видом самих коливань, тобто величинами коливних переміщень і швидкостей.

Отже, розглянуту коливну систему потрібно віднести до неконсервативних, нелінійних, так званих "автономних автоколивних систем".

У випадку, коли в правій частині рівняння з'явиться і буде мати вирішальне значення зовнішня змінна сила, що викликана дефектами верстата, у порівнянні з усіма іншими силами, система буде не автономною автоколивною системою, а системою змушених коливань під дією зовнішньої змінної сили.

Колівання заготовки та інструменту під час вібрацій, як показує запис переміщень в проведених нами дослідах за допомогою експериментальної

установки для дослідження вібрацій (рис.2), зазвичай дуже близькі до синусоїдальних.



*Рис. 2 Осцилограма поперечних коливань інструменту.*

Більш точно ці криві, що характеризують відносні переміщення заготовки та інструменту, повинні являти собою дещо несиметричні синусоїди, так як в момент максимального радіального переміщення  $u_0$  буде додаватися ще й близьке до максимального переміщення  $z_0$ .

Але досвід показує, що вказане "спотворення" синусоїди на поверхні заготовки в звичайних умовах дуже мале.

Тому рішення рівняння (5) для коротких відрізків часу (в секундах) ми будемо шукати у вигляді виразу:

Не підтверджено, що під час коливання виробу, досить близького до простого синусоїдального закону, зміни нарощування сил  $\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z$ , також будуть змінюватися за законом, наближеним до синусоїдального.

На рис. 3 показані одночасні зміни  $y_u$  і  $P_y$ , з яких видно, що під час досить близьких до синусоїдального закону змінах переміщень  $y_u$  зміни сили  $P_y$  йдуть за законом, що досить сильно відрізняється від синусоїдального закону.

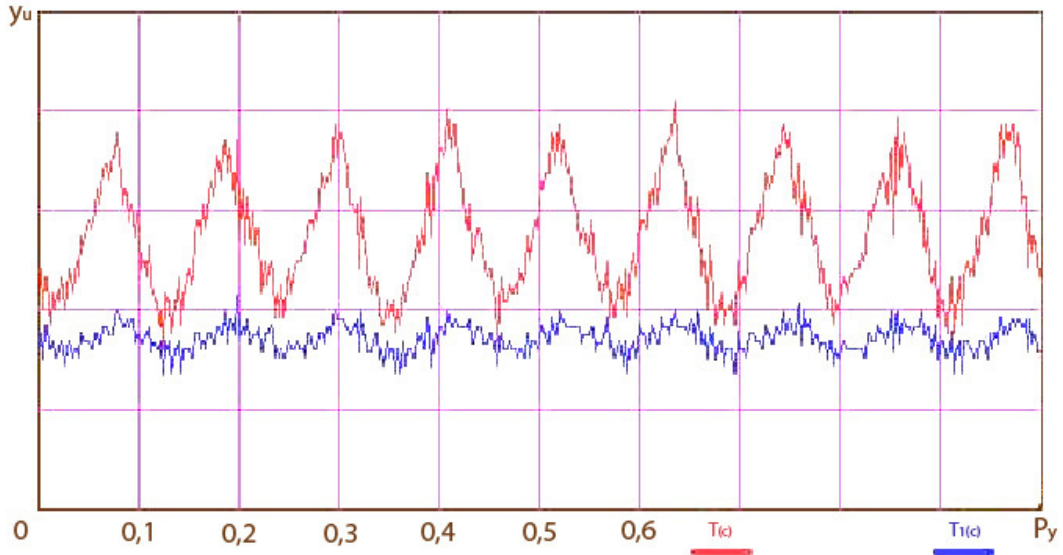


Рис. 3 Осцилограма поперечних керувань шліфувального круга та заготовки під час шліфування.

Диференціальне рівняння розглянутого коливного руху в зоні шліфування у напрямку  $Y - Y$  (рівняння 5) системи з зосередженими параметрами для випадку шліфувального верстата має вигляд (індекси опущені):

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + \omega_0^2 y = c\epsilon^{bvv} (e^{k_y \dot{y}} - 1) + k e^j (e^{k_y \dot{y}} - 1) + \frac{P_y e}{\pi \Delta} \left( \frac{k_y \sin \varphi}{\omega} \dot{y} + 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cdot k_y y \right) \quad (6)$$

Так як зміни частоти під час вібрацій досить невеликі, то для спрощення будемо вважати, що частота  $\omega$ , що стоїть в знаменнику одного з членів правої частини рівняння, не залежить від часу.

Диференційне рівняння (6) використано для визначення амплітуди та частоти коливань системи заготовка-інструмент, що є підставою для визначення амплітудних та крокових параметрів мікрорельєфу шліфованої поверхні.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень параметрів вібрацій технологічної системи шліфування дозволили підтвердити адекватність математичних моделей динамічної системи шліфування.

**Висновки.**

Запропонований спосіб моделювання технологічної системи шліфування може використовуватись для прогнозування динамічних характеристик шліфувальних операцій на стадії технологічного проектування.

**Література**

1. Марчук В.І., Моделювання динамічної системи безцентрового різного шліфування робочих поверхонь роликотідшипників // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), вип. 14, серпень 2004 – Луцьк, 2004.
2. Якімов О.В., Новиков Ф.В., «Високопродуктивне шліфування», - К.: ІНТМ, 1995. – 180 с.
3. Каширин А.И., «Исследование вибрации при резании металла», - Москва, 1944г.