

## ОСОБЛИВОСТІ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ЗУБЦІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ ФОРМОУТВОРЕННЯМ

© Литвиняк Я.М., 2013

Проаналізовано кінематичні особливості складного руху дискового інструмента стосовно заготовки циліндричного зубчастого колеса у процесі радіально-колового формоутворення зубців. Встановлена відмінність між розглядуваним способом зубонарізання та методом обкату. Визначено положення осі миттєвого гвинтового руху, що дасть змогу прогнозувати профіль нарізаних зубців колеса залежно від вихідної форми різального зубця дискового інструмента.

**The kinematical peculiarities of the disk instrument complicated motion in relation to the purveyance of cylinder gear-wheel in the cutting a new radial-around forming process have been analyzed. The difference between this process and the traditional method of cutting cylinder gear-wheels has been determined. The instantaneous spiral motion axis position has been defined. The kinematics process allows to forecast the type of indents of wheel.**

**Постановка проблеми.** Функціональних показників зубчастих передач досягають завдяки реалізації виробничого процесу виготовлення зубчастих коліс, в якому найбільша прерогатива надається технологічним операціям зубооброблення. На цих операціях забезпечують отримання параметрів точності зубчастих коліс, які разом із техніко-економічними показниками безпосередньо впливають на кінцеву собівартість та експлуатаційні показники виробів. Використовувані на підприємствах традиційні процеси зубооброблення, які реалізують метод обкату для формоутворення бокових поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс, потребують вартісних інструментів (черв'ячних фрез, довбачів тощо), що мають низький період стійкості і загалом обмежують можливості підвищення продуктивності праці на операціях зубонарізання. Це спонукає виконувати наукові, конструкторсько-технологічні пошукувальні для істотної роботи удосконалення існуючих і розроблення нових процесів формоутворення зубців коліс. До нових, перспективних процесів зубонарізання належить спосіб радіально-колового формоутворення профілю зубців за безперервного, взаємоузгодженого обертання заготовки зубчастого колеса та дискового інструмента. Згаданий процес має доволі високі потенційні можливості щодо підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів виготовлення, а для його впровадження необхідно розробити науково-обґрунтовані рекомендації, які базуються насамперед на кінематичних особливостях цього процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукове дослідження процесу радіально-колового формоутворення з безперервним діленням (РКБД) висвітлюється в багатьох публікаціях [1–4], в яких теж досліджуються певні його характеристики. Процес РКБД належить до кінематично складних внаслідок дії разом трьох фактично незалежних, різноспрямованих у просторі рухів обертання, параметри яких істотно впливають на результати формоутворення – профіль зубців циліндричного зубчастого колеса. Отже, розроблення, з позицій кінематичного аналізу, теоретичних засад процесу РКБД належить до актуальних, що загалом уможливить підвищити ефективність впровадження удосконалених операцій зубонарізання та реалізації сучасних засад конструкторської та технологічної підготовки виробництва.



постійним середнє значення кутової швидкості  $\omega_{01}$ . У цьому випадку, враховуючи запропоновані в [2] конструктивні особливості ДЗКШ, співвідношення між кутами повороту та кутовими швидкостями вхідної та вихідної ланок ДЗКШ набувають такого вигляду:

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} = \left( \frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2}; \quad \frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \left( \frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^2 \cdot \cos^2 \frac{\varphi_1}{2} \cdot \left( \cos^2 \frac{\varphi_{01}}{2} \right)^{-1}, \quad (2)$$

де  $e_r$  та  $l_0$  – основні конструктивні параметри ДЗКШ, відповідно величина радіального зміщення використовуваних в ДЗКШ зубчастих коліс та міжосьова відстань між ними [2].

Після відповідних перетворень вирази (2) матимуть такий вигляд:

$$\cos^2 \frac{\varphi_1}{2} = \left[ 1 + \left( \frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^4 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{01}}{2} \right]^{-1} \quad \frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \left( \frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^2 \cdot \left[ \left( 1 + \left( \frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^4 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{01}}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi_{01}}{2} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Нарізання циліндричних зубчастих коліс способом РКБД доцільно здійснювати за допомогою дискових фрез, у яких різальні зубці оснащені змінними твердосплавними пластинами, форма яких відповідає типу пластин SNHQ. Згадані пластини характеризуються різальною частиною з радіусом заокруглення  $r$  та певною своєю товщиною, яка впливає на загальну товщину дискової фрези  $\delta$ , а також на віддаль  $\delta_1$  між центрами радіусів заокруглень, які виконують функцію формоутворення (див. рис. 1). Дисковій фрезі надають додаткового обертання навколо своєї осі, що функціонально передбачено пристроєм ДЗКШ, з метою отримання раціональних швидкостей різання, що безпосередньо відобразиться на стійкості дискової фрези та якості бокової поверхні зубців колеса.

Процес формоутворення бокової поверхні зубця колеса дисковим інструментом можна розглядати як спряження двох поверхонь – вихідної інструментальної поверхні та оброблюваної поверхні. Вихідну інструментальну поверхню утворюють профілюючі ділянки різальних ребер інструмента внаслідок переміщення інструмента стосовно заготовки. Для розглядуваного дискового інструмента (фрези) функцію профілюючих ділянок різальних ребер виконують дуги радіусів заокруглень  $r$  твердосплавних різальних пластин типу SNHQ. Вихідна інструментальна поверхня та поверхня заготовки торкаються одна одної у точці дотику. У цій контактній точці вектор швидкості відносного руху знаходиться у площині, дотичній до цих поверхонь.

Для способу РКБД вихідна інструментальна поверхня утворена циліндричною фасонною поверхнею дискового інструмента (див. рис. 1), якому наданий коловий рух навколо осі  $Z_2$  заготовки зубчастого колеса та коловий рух осі встановленого з ексцентриситетом  $e$  дискового інструмента навколо осі  $Y_1$  шпindelної оправки. Внаслідок цього вихідна інструментальна поверхня має складну просторову торо- та гвинтоподібну форму. Формоутворювальні елементи різальних зубців дискового інструмента створюють вихідну інструментальну поверхню, а у точках контакту  $E_S$  – профіль оброблюваних поверхонь зубців колеса. Формоутворювальна точка контакту  $E_S$  знаходиться на фасонній поверхні дискового інструмента в площині, перпендикулярній до осі  $Z_2$  заготовки колеса, проходить через вісь дискового інструмента та точки  $O, M, G$ . Точка контакту  $E_S$  стане формоутворювальною тоді, коли для цього положення дискового інструмента, що визначається кутами повороту  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ , віддаль від точки  $M$  до осі  $Z_2$  заготовки буде найменшою. Точка  $O$ , що знаходиться на осі дискового інструмента та є центром мас навколо осі  $Z_2$  заготовки зубчастого колеса, опише замкнену періодичну гвинтову лінію, яка розміщена на торі; радіус поперечного перетину якого дорівнює величині ексцентриситету  $e$ . Вектор відносної швидкості  $\vec{V}_0$  переміщення точки  $O$ , дотичний до цієї гвинтової траєкторії, є сумою векторів лінійних миттєвих швидкостей  $\vec{V}_{01}$  та  $\vec{V}_{Y0}$  колових рухів дискового інструмента відповідно навколо осей  $Y_1$  та  $Z_2$ :

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_{01} + \vec{V}_{Y0} = (\vec{V}_{X0} + \vec{V}_{Z0}) + \vec{V}_{Y0}, \quad (4)$$

де  $\vec{V}_{X0}$  та  $\vec{V}_{Z0}$  – проекції лінійної швидкості  $\vec{V}_{01}$  колового руху навколо осі  $Y_1$ .

Коловий рух дискового інструмента навколо осі  $Y_1$  із лінійною швидкістю  $\vec{V}_{01}$  можна вважати миттєво-поступальним рухом дискового інструмента із миттєво-поступальною швидкістю  $\vec{V}_{01}$ .

Проекції цієї швидкості  $\vec{V}_{X0}$  та  $\vec{V}_{Z0}$  є також миттєво-поступальними і змінюють напрямок та величину залежно від кута повороту  $\varphi_1$ . Використовуючи залежність  $V_{01} = \omega_1 \cdot e$ , знаходимо величини проекцій швидкостей:

$$V_{X0} = V_{01} \cdot \cos \varphi_1 = \omega_1 \cdot e \cdot \cos \varphi_1; \quad (5)$$

$$V_{Z0} = V_{01} \cdot \sin \varphi_1 = \omega_1 \cdot e \cdot \sin \varphi_1. \quad (6)$$

Рух дискового інструмента є складним. Він може бути розкладений на миттєві складові рухи, а саме – на миттєво-поступальний рух дискового інструмента (рух центра мас – точки  $O$ ) зі швидкістю  $\vec{V}_{01}$  навколо осі  $Y_1$  та миттєво-обертальний рух дискового інструмента з постійною кутовою швидкістю  $\omega_{P2}$  навколо осі  $Z_2$  заготовки зубчастого колеса (кутова швидкість  $\omega_{P2} = \omega_2$ , спрямована протилежно  $\omega_2$  та прикладена до дискового інструмента). Вектор швидкості  $\vec{V}_{01}$  миттєво-поступального руху знаходиться в одній площині із віссю  $Z$  (збігається з віссю  $Z_2$ ) і спрямований під кутом  $\varphi_1$  до цієї осі.

Здійснюючи додавання миттєвих поступального та обертального рухів, отримаємо результуючий миттєво-гвинтовий рух навколо миттєвої гвинтової осі  $P_2P_{2\omega}$  (рис. 2). Кутова швидкість цього миттєво-гвинтового руху дорівнює  $\omega_{P2}$ . Миттєво-поступальна швидкість  $\vec{V}_{Z0}$  напрямлена вздовж миттєвої осі  $P_2P_{2\omega}$  та дорівнює проекції миттєвої швидкості  $\vec{V}_{01}$  на вісь  $Z_2$ . Вісь  $P_2P_{2\omega}$  миттєво-гвинтового руху розташована стосовно осі  $Z$  на віддалі  $r_2$ , яку знайдемо, використовуючи величину проекції миттєвої швидкості  $\vec{V}_{01}$  на вісь  $X$  за співвідношенням  $r_2 = \frac{V_{X0}}{\omega_2}$ .

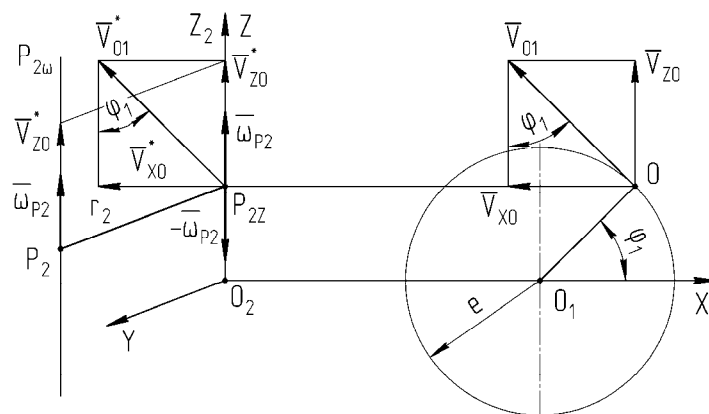


Рис. 2. Схема додавання миттєвих поступального та обертального рухів для способу РКБД

Беручи до уваги вирази (1) та (5), отримаємо

$$r_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot e \cdot Z \cdot \sin \varphi_1. \quad (7)$$

Для способу РКБД вісь миттєво-гвинтового руху  $P_2P_{2\omega}$  перпендикулярна до площини формування  $P_2P_{2Z}O$ , що паралельна до площини  $XO_2Y$ . Площина  $P_2P_{2Z}O$  проходить через вісь дискового інструмента (точку  $O$ ). Проекція  $r_2$  на площину  $P_2P_{2Z}O$  розташована на перпендикулярі до площини, в якій знаходяться вектори  $\{\vec{V}_{01}, \vec{V}_{X0}, \vec{V}_{Z0}\}$  у певний момент часу.

Положення осі дискового інструмента (точки  $O$ ) постійно змінюється залежно від кута повороту  $\varphi_1$ . Точка  $P_2$  як миттєвий центр обертання в площині формування  $P_2P_{2Z}O$  розташована з одного боку від площини  $O_2P_{2Z}O$  (поздовжньої площини симетрії дискового інструмента), якщо кут повороту  $\varphi_1$  знаходиться у межах  $0 < \varphi_1 < \pi$  або з протилежного боку від площини  $O_2P_{2Z}O$ , якщо  $\pi < \varphi_1 < 2\pi$ . Крім того, віддаль  $r_2$  протягом усього часу обертання шпиндельної оправки постійно змінюється і приймає найбільше абсолютне значення  $r_{2\max} = V_{01} / \omega_2$ , якщо  $\varphi_1 = \{\pi/2; 3\pi/2\}$ , або мінімальне значення  $r_{2\min} = 0$ , якщо  $\varphi_1 = \{0; \pi; 2\pi\}$ . Величини віддалей  $r_2$  до миттєвої осі гвинтового

руху  $P_2P_{2\omega}$  періодично повторюються для лівого та правого боку кожної прорізуваної міжзубцевої западини у заготовці зубчастого колеса. Відмінним є лише розташування осі миттєвого гвинтового руху  $P_2P_{2\omega}$ , що перпендикулярна до площини формоутворення  $P_2P_{2z}O$ . Згадана вісь паралельна до площини симетрії дискового інструмента, тобто до площини  $O_2P_{2z}O$ , яка своєю чергою, повертається на кут  $\varphi_2$  навколо осі  $Z$ .

Просторове розташування множини миттєвих центрів обертання  $P_2$  під час нарізання однієї міжзубцевої западини можна встановити за допомогою таких параметричних виразів:  $r_2 = e \cdot Z \cdot \sin \varphi_{01}$ ,  $x_{P_2} = r_2 \cdot \sin(\varphi_{01}/Z)$ ,  $y_{P_2} = r_2 \cdot \cos(\varphi_{01}/Z)$ ,  $z_{P_2} = e \cdot \sin \varphi_{01}$ . Ці вирази отримані із виразу (8) за умови відсутності пристрою ДЗКШ ( $\omega_1 = \omega_{01}$ ,  $\varphi_1 = \varphi_{01}$ ). Розташування миттєвої осі гвинтового руху  $P_2P_{2\omega}$  у торцевій площині прямозубого колеса відображено на рис. 3.

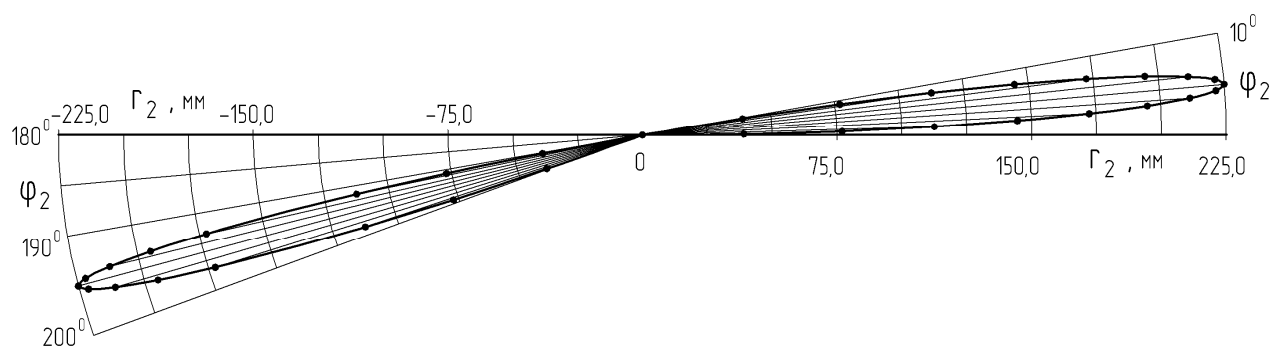


Рис. 3. Положення миттєвого центра обертання у торцевій площині прямозубого колеса під час нарізання способом РКБД однієї міжзубцевої западини ( $m = 10$  мм;  $Z = 18$ ;  $e = 12,5$  мм)

Аналізуючи кінематичні особливості процесу нарізання способом РКБД зубців прямозубого колеса, встановлена його принципова відмінність від традиційного методу обкату, який реалізується, наприклад, довбачами або черв'ячними фрезами, незважаючи на зовнішню їх подібність, а саме – безперервне обертання заготовки зубчастого колеса та шпindelної оправки з інструментом із взаємно узгодженими кутковими швидкостями. У методах обкату у верстатному зачепленні, наприклад, при нарізанні прямозубих зубчастих коліс, миттєва вісь обертання є нерухомою і розташована між осями заготовки зубчастого колеса та шпindelної оправки в одній площині або перпендикулярно до міжосьового перпендикуляра. Миттєва вісь обертання утворює лінійчасті поверхні – аксоїди за формою кругових циліндрів або площин, які в процесі зубонарізання здійснюють взаємне кочення один по одному без проковзування. Для способу РКБД вісь миттєвого гвинтового руху має змінне положення і розташована поза площиною симетрії дискового інструмента, в якій також розташована вісь заготовки. Це підтверджує отримані раніше результати щодо кінематичної відмінності процесів формоутворення зубців циліндричних коліс, що ґрунтуються на переміщеннях обкату чи переважально радіального руху зубонарізних інструментів [4]. На основі цього можна вважати, що спосіб РКБД до методів обкату не належить.

Розташування осі миттєвого гвинтового руху  $P_2P_{2\omega}$  (миттєвого центра обертання  $P_2$  в площині формоутворення  $P_2P_{2z}O$ ) дає можливість встановити координати профілю нарізуваного зубця колеса шляхом визначення координат точки контакту  $E_S$  у нерухомій системі координат  $XYZ$  та переведення їх до зв'язаної із зубчастим колесом рухомої системи координат  $X_2Y_2Z_2$  (див. рис. 2). Точка контакту  $E_S$  є спільною для вихідної інструментальної поверхні та оброблюваної бокової поверхні зубця зубчастого колеса і знаходиться на загальній нормалі, проведеної через точку  $P_2$  та точку  $G$ , що є центром кола заокруглення радіусом  $r$  різального зубця дискового інструмента. Необхідно зауважити, що для такої форми різального зубця дискового інструмента (див. рис. 1), згідно з загальноприйнятою класифікацією методів оброблення поверхонь різанням, реалізується метод дотику.

Відоме розташування центра обертання  $P_2$  в площині формоутворення  $P_2P_{2z}O$  (торцева площина заготовки прямозубого колеса) дає змогу у певній формоутворювальній точці різального зубця дискового інструмента, наприклад, у точці контакту  $E_S$ , використовуючи такі залежності

(див. рис. 1)  $V_{Erz} = \omega_{P2} \cdot (P_2 E_S)$ ;  $P_2 E_S = (P_2 G) - r$ ;  $P_2 G = \sqrt{(r_2 - \delta_1)^2 + (R_m + r)^2}$ ;  $R_m = R_e + e \cdot \cos \varphi_1$ ;  
 $R_e = R_2 \pm \chi \cdot m$ ;  $R_2 = m \cdot Z/2$ , встановити величину відносної швидкості профілювання  $\vec{V}_{Erz}$ :

$$V_{Erz} = \frac{\omega_1}{Z} \cdot \left( -r + \sqrt{(r_2 - \delta_1)^2 + (R_2 \pm \chi \cdot m + r + e \cdot \cos \varphi_1)^2} \right), \quad (8)$$

де  $R_m$  – віддаль від осі заготовки зубчастого колеса до найближчої точки середини різального ребра дискового інструмента;  $R_e$  та  $R_2$  – радіус відповідно середнього та початкового кола;  $\chi$  – коефіцієнт радіального корегування;  $m$  – модуль.

Вектор швидкості  $\vec{V}_{Erz}$  дотичний до профіля зубця колеса загалом спрямований в бік до осі обертання заготовки зубчастого колеса під час заглиблення у міжзубцеву западину дискового інструмента і в протилежний бік – під час виходу інструмента із міжзубцевої западини. Детермінованість швидкості відносного профілювання  $\vec{V}_{Erz}$  та колової швидкості у точки контакту  $E_S$  стосовно осі шпindelної оправки (можна прийняти такою, що дорівнює коловій швидкості точки  $M$  стосовно цієї самої осі для певного кута повороту  $\varphi_1$ ), загалом забезпечує можливість визначення величини миттєвої швидкості різання як важливого показника кінематично складного процесу зубонарізання РКБД і надасть можливість прогнозувати стійкість дискових інструментів (фрез), аргументовано здійснювати вибір марки інструментального матеріалу та кутової швидкості обертального руху шпindelної оправки зубофрезерного верстата.

**Висновки.** Проведене дослідження процесу нарізання зубців циліндричних зубчастих коліс дало змогу встановити, що, незважаючи на його реалізацію за допомогою безперервних, узгоджених обертальних рухів, які отримують заготовка зубчастого колеса та дисковий інструмент, і способу радіально-колового формоутворення з безперервним діленням відсутні ознаки, властиві традиційному методу обкату. Отримані співвідношення дають змогу визначити розташування змінної за розташуванням осі миттєвого гвинтового руху, забезпечують можливість прогнозування форми профілю нарізаних зубців колеса та розрахунку величини швидкості різання для обґрунтованого вибору раціональних технологічних чинників процесу зубонарізання.

1. Литвиняк Я.М. *Моделювання процесів отримання випукло-ввігнутих зубців циліндричних коліс методами обкату та радіально-колового формоутворення* / Я.М. Литвиняк // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів” 2012. – № 73. – С. 57–64. 2. Литвиняк Я.М. *Забезпечення технологічної гнучкості операцій зубонарізання в автоматизованому виробництві циліндричних зубчастих коліс підвищеної навантажувальної здатності із застосуванням процесу радіально-колового профілювання зубців* / Я.М. Литвиняк // Міжгалуз. зб. наук. пр. “Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні”. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2012. – Вип. 46 : – С. 135 – 140. 3. Литвиняк Я.М. *Розрахунок параметрів дискових інструментів для радіально-колового нарізання зубчастих вінців циліндричних зубчастих коліс* / Литвиняк Я.М. // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні” – 2011. – № 702. – С. 24–31. 4. Литвиняк Я.М. *Нарізання зубців заданого профілю дисковим інструментом за допомогою копіювального пристрою способом радіально-колового формоутворення* / Я.М. Литвиняк // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – 2011. – № 701. – С. 61–69.