

КІНЕМАТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЦІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОЛІС

© Литвиняк Я.М., 2013

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

The kinematic characteristics of complicated disk instrument motion are analysed in relation to the purveyance of cylindrical gear-wheel for radial-and-round shaping process. A difference is set between the examined method of tooth cutting and generating process method. Position of axis of instantaneous spiral motion is certain. It will allow to forecast the profile of the cut indents of wheel depending on the initial form of cutting indent of disk instrument.

Постановка проблеми. У структурі технологічних процесів виготовлення циліндричних зубчастих коліс операціям зубонарізання відведена одна з найважливіших функцій – забезпечення необхідних параметрів якості зубчастих передач, використовуваних згодом у різноманітних машинах і механізмах. Операції зубонарізання, своєю чергою, належать до таких, які загалом визначають економічні показники згаданих технологічних процесів внаслідок застосування вартісних зубообробних інструментів і верстатів. Під час нарізання циліндричних зубчастих коліс реалізують здебільшого один з найпоширеніших методів формоутворення зубців колеса – метод обкату. Метод обкату здійснюють черв'ячними фрезами на зубофрезерних верстатах, у яких рух обкату утворюється внаслідок підсумовування двох жорстко узгоджених рухів – обертання заготовки колеса та черв'ячної фрези. Рух обкату характеризується істотними обмеженнями, що визначаються кінематичними особливостями зубофрезерних верстатів і які не дозволяють зменшити основний час на зубофрезерній операції, а відтак, підвищити продуктивність і знизити собівартість виготовлення зубчастих коліс.

Одним з шляхів підвищення ефективності технологічних операцій зубонарізання є використання на наявних зубофрезерних верстатах нового технологічного процесу (способу) – радіально-колового формоутворення зубців. Цей процес здійснюють дисковим інструментом (фрезою), встановленою з відповідним ексцентриситетом на шпindelній оправці зубофрезерного верстата, а необхідне профілювання нарізаних зубців забезпечується завдяки кінематично узгодженим, безперервним рухам обертання шпindelної оправки та заготовки колеса. Кількість різальних твердосплавних зубців у застосовуваних дискових фрезах у декілька разів перевищує кількість різальних рейок черв'ячних фрез, що дає змогу підвищити технологічні режими, знизити тривалість зубофрезерної операції, підвищити період стійкості різального інструмента та зменшити експлуатаційні витрати на підтримання його працездатності. Потенційні можливості нового процесу можуть бути реалізовані лише завдяки існуванню науково обґрунтованих рекомендацій для його застосування і впровадження під час виготовлення нових зубчастих коліс чи здійснення ремонтних заходів для відновлення зубчастих передач у діючому обладнанні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічному процесу (способу) радіально-колового формоутворення з безперервним діленням (РКБД) притаманна низка позитивних властивостей, які були виявлені, експериментально підтверджені та певним чином теоретично обґрунтовані [1–3]. Процес РКБД, який реалізується на зубофрезерних верстатах, незважаючи на зовнішню подібність до методу обкату, має такі особливості формоутворення зубців коліс, які не описуються кінематичними співвідношеннями, що властиві процесу зубонарізання черв'ячними фрезами. Однак, практичне застосування способу РКБД має сенс лише за умови надійного отримання такого профілю зубців коліс, який дасть змогу забезпечити потрібні характеристики зачеплення у зубчастій передачі, що потребує проведення дослідження процесу зубонарізання на основі основних засад кінематичного аналізу.

Формулювання мети досліджень. Розроблення теоретичних положень процесу отримання профілю зубців у циліндричних зубчастих колесах на основі кінематичного аналізу способу зубонарізання радіально-коловим формоутворенням з безперервним діленням.

Викладення основного матеріалу дослідження. Особливість застосування черв'ячних фрез на зубофрезерних верстатах полягає у існуванні складного руху обкату різальних зубців черв'ячної фрези відносно бокових поверхонь нарізаних зубців циліндричного зубчастого колеса. Рух обкату створюють перпендикулярно до напрямку обертання черв'ячної фрези. Розташування осей обертання заготовки зубчастого колеса та черв'ячної фрези залишаються незмінними. Міжзубцеві западини у нарізаному зубчастому колесі утворюються зубцями, розташованими на витках черв'ячної фрези, які під час обертання заготовки та інструмента «супроводжують» зубці колеса на довжині лінії зачеплення. У такому верстатному зачепленні, наприклад, при нарізанні прямозубих зубчастих коліс, миттєва вісь обертання є нерухомою і розташована між осями колеса та черв'ячної фрези та перетинає початкове коло колеса та початкову пряму фрези у точці їх дотику.

Спосіб РКБД принципово відмінний від розглянутого методу зубонарізання черв'ячними фрезами незважаючи на те, що вони реалізуються на тих самих зубофрезерних верстатах за умови безперервного обертання заготовки зубчастого колеса та шпинделя верстата з узгодженими кутовими швидкостями. Під час РКБД дисковий інструмент розташований незмінно у радіальній площині зубчастого колеса. Прорізання міжзубцевої западини та формування правого та лівого профілю зубців у зубчастому колесі здійснюється за допомогою періодичного переміщення дискового інструмента «до» та «від» осі заготовки прямозубого колеса. Розташування дискового інструмента є різним відносно початкового кола зубчастого колеса. Тому, немає такої ж миттєвої осі обертання як у верстатному зачепленні черв'ячна фреза – зубчасте коло. Процеси обкату та РКБД кінематично відмінні, а спосіб РКБД до методів обкату не належить.

Практична реалізація процесу РКБД можлива завдяки простій у застосуванні методиці прогнозування форми отриманого профілю нарізаних зубців. Розроблені раніше методики ґрунтуються на порівняно складному математичному апараті – диференціюванні складних параметричних залежностей, розв'язуванні систем нелінійних тригонометричних рівнянь. Досягнути такого спрощення можна використовуючи особливості кінематичного аналізу складного руху твердого тіла, який складається із поступального та обертального рухів.

Технологічна операція зубонарізання способом РКБД здійснюється дисковим інструментом (фрезою) на зубофрезерному верстаті згідно з типовою схемою налагодження, що використовується для однозахідних черв'ячних фрез. Відмінність полягає у тому, що на шпindelній оправці зубофрезерного верстата встановлюють ексцентрикову оправку разом із додатковим інструментальним пристроєм динамічної зміни кутової швидкості (ДЗКШ) (рис. 1).

Ексцентрикова оправка дозволяє змістити вісь дискового інструмента O на величину ексцентриситету e відносно осі шпindelної оправки O_1Y_1 та осі шпindelя зубофрезерного верстата. Співвідношення між кутом повороту і кутовою швидкістю заготовки зубчастого колеса (φ_2 , ω_2) та шпindelної оправки (φ_{01} , ω_{01}) мають такий вигляд: $\varphi_{01} = Z \cdot \varphi_2$; $\omega_{01} = Z \cdot \omega_2$, де Z – число зубців зубчастого колеса. Своєю

чергою ДЗКШ, зберігаючи рівномірність поділу заготовки зубчастого колеса на ціле число зубців Z , дозволяє на отримуваний від шпindelної оправки рівномірний обертовий рух ексцентрикової оправки накласти певний періодичний, нерівномірний обертовий рух. Внаслідок чого ексцентрикова оправка разом із встановленим на ній дисковим інструментом отримує нерівномірну кутову швидкість

$$\omega_1 = \omega_{01} \cdot \left(\frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^2 \cdot \left[\left(1 + \left(\frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^4 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\Phi_{01}}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\Phi_{01}}{2} \right]^{-1} \quad \text{та нерівномірний кут повороту}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\Phi_{01}}{2} = \left(\frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\Phi_{01}}{2} \quad [1, 2].$$

Профільовання зубців циліндричних коліс пропонується здійснювати за допомогою дискових фрез, у яких різальні зубці оснащені змінними твердосплавними пластинами типу *SNHQ*. Різальна частина цих твердосплавних пластин має радіус заокруглення r (існує широкий вибір уніфікованих типів пластин із різними величинами r), що позитивно позначається на процесах формоутворення, різання та загальній стійкості дискової фрези. Загальна товщина дискової фрези 2δ та віддаль $2\delta_1$ між центрами радіусів заокруглень доповнюють геометричні характеристики дискового інструмента (див. рис. 1).

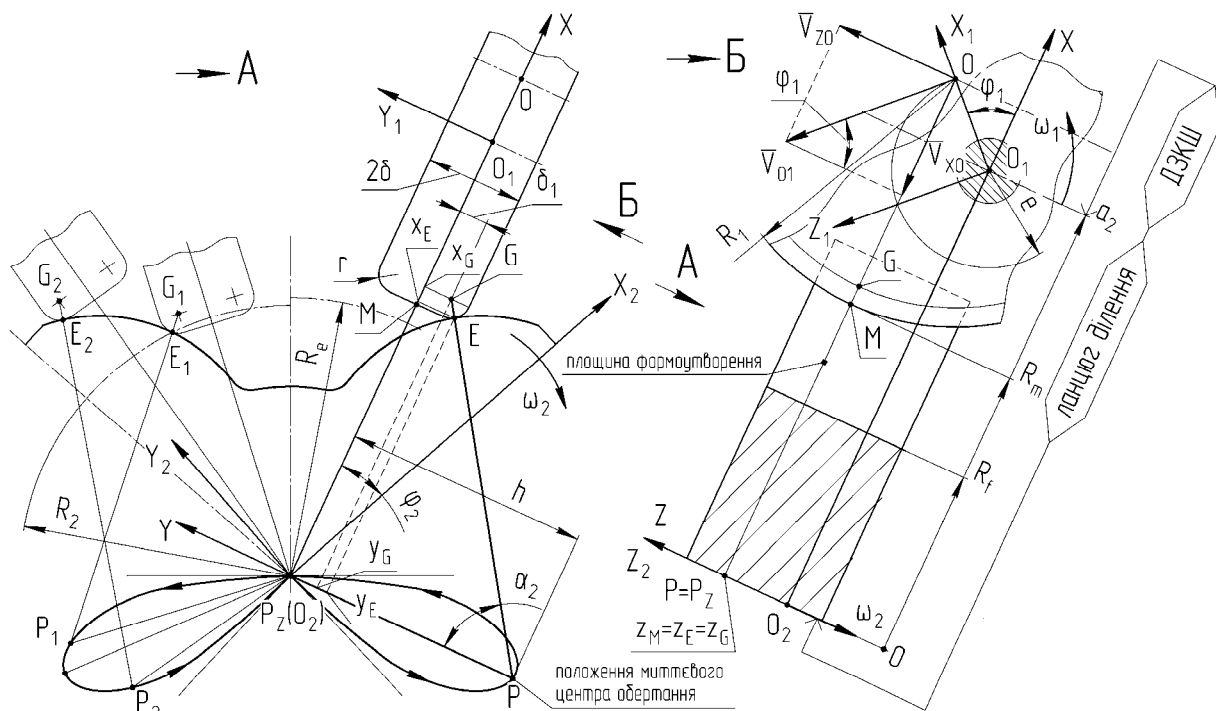


Рис. 1. Отримання профілю зубців дисковим інструментом способом РКБД

Профіль зубця колеса утворюється внаслідок контакту в точці профілювання оброблюваної та вихідної інструментальної поверхонь. Формування профілю зубця здійснюється в площині формоутворення. Вісь дискового інструмента O постійно знаходиться в площині формоутворення. Для прямозубого колеса площина формоутворення перпендикулярна осі колеса O_2Z_2 (див. рис. 1). У будь-який момент часу площина формоутворення займає інше положення, яке визначається кутом повороту Φ_1 ексцентрикової оправки. Для цього дискового інструмента (фрези) функцію профілюючих ділянок різальних ребер виконують дуги радіусів заокруглень r твердосплавних різальних пластин. Згадані дуги заокруглень r утворюють вихідну інструментальну поверхню в результаті обертання різальних зубців дискового інструмента навколо його осі та повороту дискового інструмента навколо осі заготовки. Вихідна інструментальна поверхня та поверхня заготовки торкаються одна одної в точці контакту E . Формоутворюючою точкою контакту E

виявиться тоді, коли для певного положення дискового інструмента, що визначається кутами повороту φ_1 та φ_2 , віддаль від периферійної точки M до осі Z_2 заготовки буде найменшою. Центр мас дискового інструмента, який знаходиться в точці O у складному русі навколо осі Z_2 заготовки зубчастого колеса опише просторову замкнуту періодичну гвинтову лінію, яка знаходиться на торі, радіус поперечного перетину якого дорівнює величині ексцентриситету e .

Дисковому інструменту може надаватись додатковий рух обертання навколо своєї осі O (передбачено конструкцією ДЗКШ), з метою отримання раціональної швидкості різання, яку вибирають для певного матеріалу заготовки зубчастого колеса. Це дає змогу вважати дисковий інструмент твердим тілом, для якого допустимим є застосування одного із принципів кінематичного аналізу, а саме додавання поступального та обертального рухів.

Характеристикою обертового руху зміщеної осі O дискового інструмента навколо осі шпindelної оправки O_1Y_1 є колова швидкість \vec{V}_{O1} (див. рис. 2). Цей коловий рух дискового інструмента навколо осі O_1Y_1 у певний момент часу можна вважати миттєво-поступальним. Вектор миттєвої швидкості \vec{V}_{O1} доцільно розкласти на дві характерні проекції \vec{V}_{X0} та \vec{V}_{Z0} . Ці швидкості також є миттєво-поступальними і змінюють свої напрямки та величини залежно від кута повороту φ_1 .

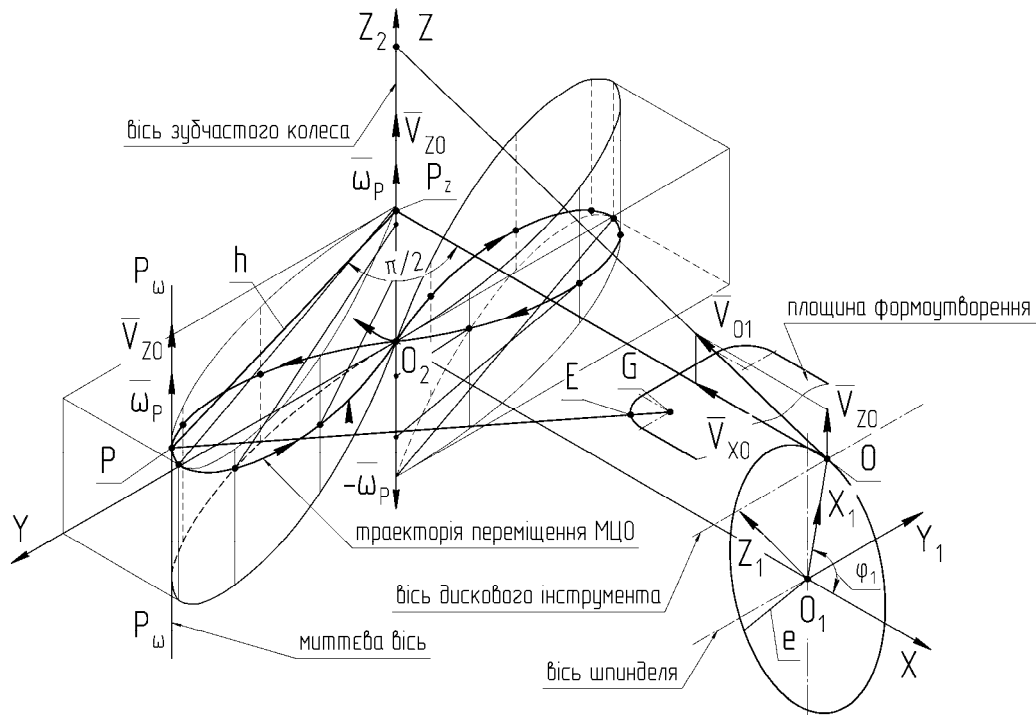


Рис. 2. Кінематична схема визначення положення миттєвої осі гвинтового руху для способу радіально-колового формоутворення

Вектор миттєвої швидкості \vec{V}_{O1} перетинає вісь заготовки колеса O_2Z_2 , а відтак, і вектор кутової швидкості $\vec{\omega}_2$ під певним змінним кутом φ_1 . У точці перетину вектор швидкості \vec{V}_{O1} розкладаємо на згадані вище дві складові \vec{V}_{X0} та \vec{V}_{Z0} , які спрямовані відповідно вздовж і перпендикулярно до осі O_2Z_2 . Використовуючи залежність $V_{O1} = \omega_1 \cdot e$, знаходимо величини проекцій миттєвих швидкостей:

$$V_{X0} = V_{O1} \cdot \cos \varphi_1 = \omega_1 \cdot e \cdot \cos \varphi_1; \quad V_{Z0} = V_{O1} \cdot \sin \varphi_1 = \omega_1 \cdot e \cdot \sin \varphi_1 \quad (1)$$

Дисковий інструмент перебуває в переносному миттєво-поступальному русі із швидкістю \vec{V}_{O1} і відносному обертальному русі із постійною кутовою швидкістю $\vec{\omega}_2$ навколо осі O_2Z_2 . У

нерухомій системі координат XYZ (осі Z та Z_2 збігаються), здійснюючи додавання миттєвих поступального та обертального рухів, отримуємо результуючий (абсолютний) рух, яким буде миттєвий гвинтовий рух навколо миттєвої осі PP_ω з лінійною миттєвою швидкістю \vec{V}_{Z0} і кутовою швидкістю $\vec{\omega}_P$ (величини кутових швидкостей дорівнюють $\omega_P = \omega_2$, вектор $\vec{\omega}_P$ спрямований протилежно $\vec{\omega}_2$ та прикладений до дискового інструмента). Миттєва поступальна швидкість \vec{V}_{Z0} спрямована вздовж миттєвої осі PP_ω та дорівнює проекції миттєвої швидкості \vec{V}_{01} на вісь O_2Z_2 . Вісь PP_ω миттєвого гвинтового руху розташована відносно осі Z на віддалі h , яку знайдемо, використовуючи величину проекції \vec{V}_{X0} миттєвої швидкості \vec{V}_{01} на вісь X за співвідношенням:

$$h = \frac{V_{X0}}{\omega_2} \quad \text{або} \quad h = \frac{\omega_1}{\omega_{01}} \cdot e \cdot Z \cdot \sin \varphi_1 . \quad (2)$$

Вісь миттєвого гвинтового руху PP_ω перпендикулярна до площини формоутворення PP_2O , яка проходить через вісь дискового інструмента (точку O) або паралельна до осі O_2Z . У будь-який момент часу, положення відрізка h змінюється, однак, відрізок h завжди перпендикулярний до площини векторів $\{\vec{V}_{01}, \vec{V}_{X0}, \vec{V}_{Z0}\}$ та знаходиться у площині формоутворення PP_2O . Відрізок h визначає положення миттєвого центра обертання P , який також знаходиться в площині формоутворення PP_2O . Віддаль h протягом всього часу обертання шпindelної оправки постійно змінюється і приймає найбільше абсолютне значення $h_{max} = V_{01} / \omega_2$, якщо $\varphi_1 = \{\pi/2 ; 3\pi/2\}$ або мінімальне значення $h_{min} = 0$, якщо $\varphi_1 = \{0 ; \pi ; 2\pi\}$. Траєкторія руху центра P миттєвого обертального руху нагадує кардіоїду.

Визначеність розташування осі миттєвого гвинтового руху PP_ω , а відтак миттєвого центра обертання P в площині формоутворення PP_2O , дає можливість встановити координати профілю нарізаного зубця колеса шляхом визначення координат точки контакту E у нерухомій системі координат XYZ та переведення їх до зв'язаної із зубчастим колесом рухомої системи координат $X_2Y_2Z_2$ (див. рис. 1, 2). Точка контакту E є спільною для вихідної інструментальної поверхні та оброблюваної бокової поверхні зубця зубчастого колеса і знаходиться на загальній нормалі, проведеної через точку P та центр G 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 різання, реалізується метод дотику.

Використовуючи співвідношення між радіусом R_m периферійної точки дискового інструмента відносно осі заготовки зубчастого колеса $R_m = R_e + e \cdot \cos \varphi_1$, радіуса R_e середнього кола $R_e = R_2 \pm k \cdot m$ (k – коефіцієнт зміщення середнього кола відносно ділального кола), отримуємо вирази для розрахунку координат точки лінії контакту (характеристики) в нерухомій системі координат XYZ :

$$\begin{aligned} X_E &= (X_G - r \cdot \sin \alpha_2) = R_m + r \cdot (1 - \sin \alpha_2); \\ Y_E &= (Y_G + r \cdot \cos \alpha_2) = \delta_1 + r \cdot \cos \alpha_2; \\ Z_E &= Z_G = e \cdot \sin \varphi_1 . \end{aligned} \quad (3)$$

Кут α_2 знаходимо за співвідношеннями:

$$\sin \alpha_2 = (R_m + r) \cdot \left((R_m + r)^2 + (h - \delta_1)^2 \right)^{-1/2}; \quad \cos \alpha_2 = (h - \delta_1) \cdot \left((R_m + r)^2 + (h - \delta_1)^2 \right)^{-1/2} \quad (4)$$

Рівняння переходу від нерухомої XYZ до рухомої $X_2Y_2Z_2$ (пов'язаної із зубчастим колесом) системи координат мають такий вигляд:

$$X_2 = X \cdot \cos \varphi_2 + Y \cdot \sin \varphi_2; \quad Y_2 = X \cdot \sin \varphi_2 - Y \cdot \cos \varphi_2; \quad Z_2 = Z . \quad (5)$$

Записуючи вирази лінії контакту (3) за допомогою співвідношень (5), знаходимо параметричні залежності, які визначають профіль зубця прямозубого колеса:

$$\begin{aligned} X_2 &= X_E \cdot \cos \varphi_2 + Y_E \cdot \sin \varphi_2; \\ Y_2 &= X_E \cdot \sin \varphi_2 - Y_E \cdot \cos \varphi_2; \\ Z_2 &= Z_E. \end{aligned} \quad (6)$$

Форма ліній контакту (див. (3)) в радіальній та торцевій площинах зубчастого колеса відображена на рис. 3. Лінії контакту мають форму, зовсім іншу від форми лінії контакту черв'ячної фрези та нарізаного зубчастого вінця прямозубого колеса, яка в останньому випадку є відрізком прямої, що проходить через полюс верстатного зачеплення (знаходиться на початковому колі нарізаного зубчастого колеса). Для способу РКБД лінії контакту розташовані симетрично прямої, що знаходиться у площині формоутворення, є паралельною до осі дискової фрези і розташована дотично до середнього кола радіусом R_e . Із зменшенням радіуса заокруглення r кривизна ліній контакту в площині формоутворення зростає і перетворюється у два паралельні відрізки, розташовані на віддалі, яка дорівнює ширині фрези 2δ , а в радіальній площині – у два кола радіусом, що дорівнює e (див. рис. 3, ряд 7).

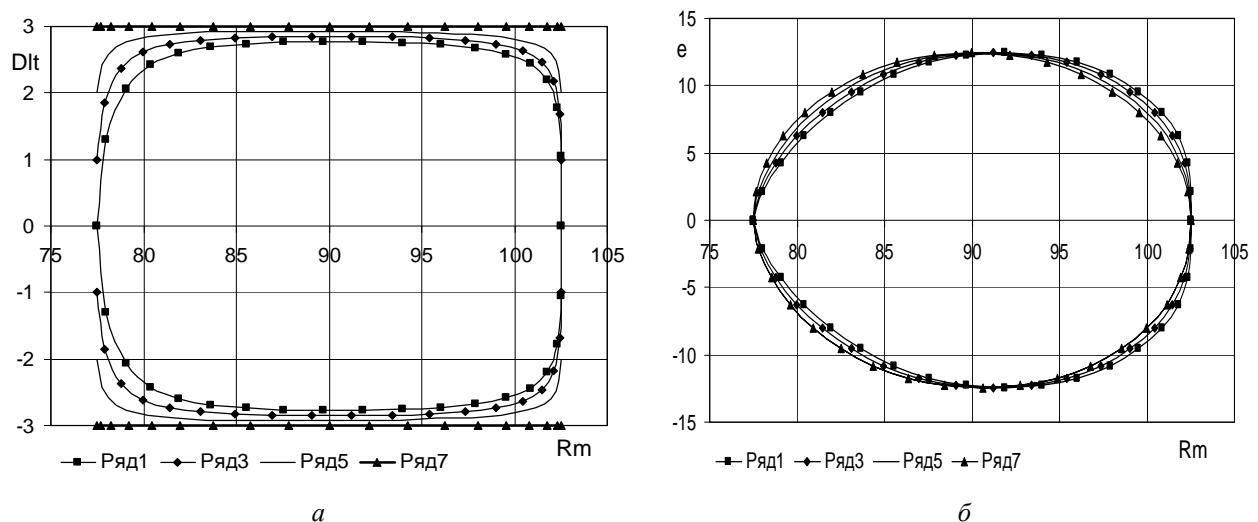


Рис. 3. Лінії контакту верстатного зачеплення в площині формоутворення (а) та в радіальній площині зубчастого колеса (б) при формуванні способом РКБД однієї міжзубцевої западини ($m = 10$ мм; $Z = 18$; $e = 12,5$ мм; $2\delta = 6$ мм; ряд 1 – $r = 3$ мм; ряд 3 – $r = 2$ мм; ряд 5 – $r = 1$ мм; ряд 7 – $r = 0$ мм)

У найпростішому варіанті реалізації способу РКБД (пристрій ДЗКШ – відсутній, $\omega_1 = \omega_{01}$, $\varphi_1 = \varphi_{01}$), просторове розташування множини миттєвих центрів обертання P при нарізанні однієї міжзубцевої западини можна встановити за допомогою таких параметричних виразів:

$$h = e \cdot Z \cdot \sin \varphi_{01}, \quad x_P = h \cdot \sin(\varphi_{01}/Z), \quad y_P = h \cdot \cos(\varphi_{01}/Z), \quad z_P = e \cdot \sin \varphi_{01}.$$

Величина максимальної віддалі h_{\max} розташування центра P миттєвого обертового руху, якщо пристрій ДЗКШ відсутній, може в декілька разів перевищувати радіус діляльного кола R_2 прямозубого зубчастого колеса, а із збільшенням ексцентриситету e та числа зубців Z монотонно зростає (рис. 4).

Профіль, отриманий за допомогою пристрою РКБД і розрахований за запропонованою методикою, практично повністю збігається з активною ділянкою евольвентного профілю зубця. Для вихідних умов, відображених на рис. 5, найбільша похибка профілю на діляльному діаметрі не перевищує 0,4 мм.

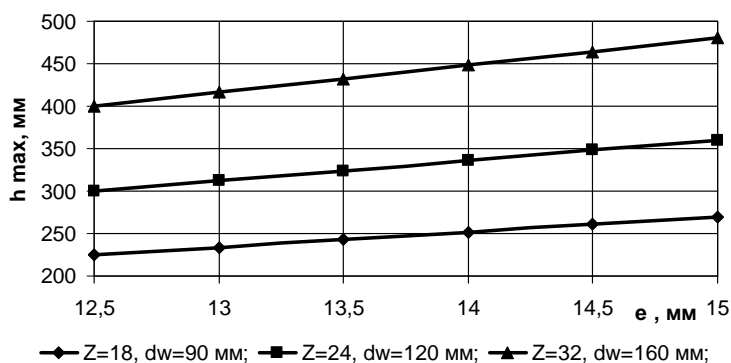


Рис. 4. Вплив на максимальну віддаль розташування осі миттєвого обертального руху залежно від ексцентриситету встановлення дискового інструмента ($t = 10$ мм, пристрій ДЗКШ – відсутній)

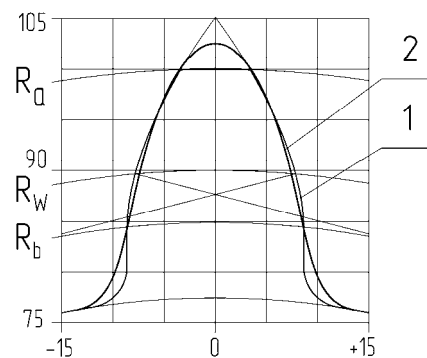


Рис. 5. Зовнішній вигляд евольвентного (1) та синусоподібного (2) профілю зубця прямозубого колеса ($t = 10$ мм; $Z = 18$; $e = 12,5$ мм; $2\delta = 6$ мм; $r = 3$ мм; $l_0 = 60$ мм; $er = 5$ мм)

Висновки. Дослідження процесу нарізання зубців циліндричних зубчастих коліс способом радіально-колового формоутворення дали змогу встановити, що для нього характерні ознаки, які не властиві традиційному методу обкату. Отримані прості співвідношення, які дозволяють встановити форму профілю нарізаних зубців колеса та проводити обґрунтований вибір конструктивних чинників, які забезпечують отримання мінімальних похибок отриманого профілю зубців коліс відносно теоретичного евольвентного профілю зубця.

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». – 2012. – № 730: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 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 Міжгалузевий збірн. наук. праць. / Я.М. Литвиняк. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – Вип. 46: Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 135–140. 3. Литвиняк Я.М. Технологічні аспекти процесу радіально-колового нарізання циліндричних зубчастих коліс з динамічною зміною швидкості різання. Литвиняк Я.М. // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 729: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 19–25. 4. Локтев Д.А. Рациональная эксплуатация современных червячных фрез // Оборудование и инструмент для профессионалов. Сер. Металлообработка. – 2007. – № 4. – С. 20–23.