

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКОВИМИ ФРЕЗАМИ ЗУБЦІВ З МОДИФІКОВАНИМ ПРОФІЛЕМ У ПРЯМОЗУБИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛЕСАХ

© Литвиняк Я. М., 2017

Розглянуто основні особливості способу радіально-колового нарізання зубців у циліндричних зубчастих колесах великих і середніх модулів за допомогою дискових фрез за безперервного обертання заготовки зубчастого колеса. Процес радіально-колового нарізання зубців здійснюється за допомогою додаткового інструментального пристрою зміни кутової швидкості. Вибір регульованих технологічних і конструктивних факторів дає змогу адаптувати траєкторію руху дискової фрези для нарізання профілю зуба колеса із потрібними геометричними параметрами. Отримано математичні моделі, що описують процес утворення на бокових поверхнях зубців модифікованого синусоподібного профілю, який найбільш наближений до заданого евольвентного профілю зуба. Для різної кількості зубців зубчастих коліс наведено для порівняння модифіковані синусоподібні та відповідні їм евольвентні профілі.

**Ключові слова:** нарізання зубців, зубчасті циліндричні колеса, дискові фрези, спосіб радіально-колового формоутворення.

Ya. Lytvynyak

## CONTINUOUS SHAPING PROCESS SIMULATION BY DISK MILLING CUTTERS OF MODIFIED PROFILE INDENTS IN SPUR GEAR-WHEELS

The basic features of the radial-and-round method indents cutting are considered in the cylindrical gear-wheels of the large and middle modules by means of the disk milling cutters at the continuous rotation of gear-wheel purveyance. The radial-and-round cutting process of indents accomplishes by means of additional instrumental device of change of angulator. The choice of the managed technological and structural factors allows adapting the motion trajectory of disk milling cutter for cutting the wheel tooth profile with necessary geometrical parameters. Mathematical models, that describe the process of formation on the indents sides the modified sine-similar profile that is most close to the set involute tooth profile, are got. For the different numbers of gear-wheels indents are resulted for comparison the modified sine-similar and corresponding to them involute profiles.

**Key words:** cutting of indents, cylindrical gear-wheels, disk milling cutters, radial-and-round shaping process.

**Постановка проблеми.** Циліндричні зубчасті передачі широко використовуються для передачі обертового руху в сучасних машинах та механізмах, що застосовуються в машинобудівній, гірничо-видобувній, енергетичній, переробній галузях промисловості, на транспорті, в будівництві, сільському господарстві. Функціональні характеристики циліндричних зубчастих передач переважно забезпечуються операціями формоутворення бокових поверхонь зубців. До найпоширеніших операцій формоутворення належать операції зубофрезерування, що здійснюються за допомогою черв'ячних фрез на зубофрезерних верстатах за реалізації методу обкату та способу формоутворення огинанням. Нарізання циліндричних зубчастих коліс черв'ячними фрезами характеризується значною

технологічною собівартістю, яку складають переважно висока вартість і низька стійкість черв'ячних фрез, відносно низька продуктивність, висока вартість зубофрезерних верстатів. Вплив згаданих особливостей зубофрезерування значно зростає у разі виготовлення зубчастих коліс великих модулів. Отже, розроблення нових, ефективних, ресурсоощадних технологій виготовлення циліндричних зубчастих коліс, які дають змогу забезпечити регламентовані технічними умовами експлуатаційні параметри, належить до актуальних завдань машинобудівного виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні еволюційні напрямки розвитку технологічних операцій нарізання зубчастих коліс зосереджені на покращенні традиційних зубонарізних інструментів і удосконалення конструкцій зубофрезерних верстатів. Однак, зміни у найпоширеніших зубонарізних інструментах, наприклад, черв'ячних фрезах, стосуються здебільшого інструментальних матеріалів, зокрема швидкорізальних сталей, та нанесенні сучасних зносостійких покриттів, а зміни в конструкції зубофрезерних верстатів полягають у використанні для обертання черв'ячної фрези, столу верстату із заготовкою колеса та приводів подач окремих електродвигунів, керованих системою ЧПК. Загалом це не усуває жорсткого зв'язку (кінематичного) між обертовими рухами черв'ячної фрези та столу зубофрезерного верстату та не змінює метод нарізання (формування) зубців циліндричних зубчастих коліс та конструкцію черв'ячної фрези, а відтак, не супроводжується суттєвим підвищенням продуктивності обробки, що могло б виправдати значні експлуатаційні витрати, які відображаються у зростанні технологічної собівартості обробки [1].

Підвищення продуктивності на операції зубонарізання можливе лише внаслідок кардинальної зміни принципів, покладених у процес формування зубців коліс. Одним із таких перспективних процесів, що може застосовуватись на зубофрезерних операціях при нарізанні циліндричних зубчастих коліс, зокрема великомодульних є спосіб радіально-колового зубонарізання дисковою фрезою (ДФ) з безперервним діленням (безперервним обертанням заготовки) – спосіб РКБД. Цей спосіб реалізується на універсальних зубофрезерних верстатах з додатковим їх оснащенням конструктивно нескладним інструментальним пристроєм [2, 5]. Спосіб РКБД ґрунтується на застосуванні ДФ, ексцентрично встановленої на обертовій інструментальній оправці, закріпленій у шпинделі зубофрезерного верстата. Нарізання зубчастого колеса відбувається за безперервного обертання столу верстата разом із циліндричною заготовкою зубчастого колеса (ЗК) та інструментальної оправки із встановленою з ексцентриситетом ДФ. Обертово-гармонійний рух ДФ разом із узгодженим із ним безперервним обертовим рухом заготовки ЗК спричиняє кінематичне формування бокових поверхонь зубців ЗК та надання їм синусоподібного профілю [4].

Незважаючи на очікувані сподівання, особливості процесу утворення профілю зубців способом РКБД суттєво обмежують його застосування. Це пояснюється тим, що періодичним обертовим рухом ексцентрично встановленої ДФ можна отримати синусоподібний профіль зубців, який не завжди забезпечує потрібні характеристики зачеплення коліс у передачі. Крім цього, застосування ДФ із різальними зубцями, у яких головне різальне ребро має ширину, прийнятну для реального здійснення процесу різання, супроводжується зменшенням ширини нарізаного зубця колеса на величину, що приблизно рівна подвійній довжині головного різального ребра зубця ДФ [2–4]. Отже, застосування способу РКБД можливе тільки за умови безперервного кінематичного впливу на процес формування кожної бокової поверхні нарізаних зубців. У цьому випадку за рівномірного обертового руху заготовки ЗК формування зубців необхідно виконувати лише при наданні ексцентриковій частині інструментальної оправки разом із ДФ нерівномірного обертового руху за допомогою додаткового пристрою зміни кутової швидкості – ПЗКШ, який забезпечує отримання модифікованого синусоподібного профілю нарізаних зубців. Крім цього, ДФ може надаватися від окремого приводу (наприклад, електродвигуна) додатковий обертовий рух з кутовою швидкістю, що значно перевищує кутову швидкість обертання інструментальної оправки [2, 3], що дасть змогу повною мірою використовувати функціональні характеристики інструментальних матеріалів з яких отримані різальні зубці ДФ. Для практичного застосування технологічних та конструктивних особливостей способу РКБД необхідно отримати співвідношення, що

визначають вплив основних факторів процесу на характеристики профілю нарізаних зубців з метою його наближення до евольвентного профілю, який належить до найпоширеніших профілів зубців циліндричних зубчастих коліс.

**Формулювання мети досліджень.** Моделювання процесу безперервного формоутворення дисковими фрезами зубців з модифікованим профілем у прямозубих зубчастих колесах для отримання профілю зубців, наближеного до евольвентного.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Нарізати на зубофрезерному верстаті у прямозубих зубчастих колесах зубців модифікованого синусоподібного профілю доцільно удосконаленим способом РКБД, для якого використовують спеціальну інструментальну оправку, що містить ексцентрикову частину, якій конструктивно надано можливість здійснювати поворот на певний кут [2, 3]. Інструментальна оправка, що закріплена у шпинделі зубофрезерного верстата, обертається з кутовою швидкістю  $\omega_{01}$ . Зв'язок між кутовою швидкістю  $\omega_{01}$ , кутовою швидкістю  $\omega_2$  заготовки нарізаного ЗК і з числом його зубців  $Z$ , встановлюється за типовою для зубофрезерування залежністю -  $\omega_2 = Z \cdot \omega_{01}$ .

Періодичне колове переміщення ДФ, встановленої з ексцентрисистетом  $e$ , здійснюється за допомогою ексцентрикової частини інструментальної оправки з періодично змінюваною нерівномірною кутовою швидкістю  $\omega_1$  від спеціального пристрою зміни кутової швидкості - ПЗКШ.

Конструктивно запропоновано виконувати ПЗКШ із встановлених послідовно парних наборів однакових циліндричних зубчастих коліс, кожне з яких виконано із зміщеним зубчастим вінцем відносно осі обертання колеса [2, 3]. В окремій парі зубчасті колеса мають однакове радіальне зміщення зубчастого вінця  $e_r$  відносно осі обертання, однакову кількість зубців  $Z_{01}$  і тому однакові радіуси початкових кіл ( $R_{01} = R_{02}$ ) та однакову міжосьову відстань  $l_r$  у парах коліс ( $l_r = R_{01} + R_{02}$ ). У ПЗКШ одна пара зубчастих коліс із зміщеними зубчастими вінцями дає змогу отримати нерівномірний кут повороту  $\varphi_1$  вихідного зубчастого колеса відносно рівномірного кута повороту  $\varphi_{01}$  вхідного колеса. Для простого механізму, складеного із двох зубчастих коліс із зміщеними зубчастими вінцями, отримуємо співвідношення, що встановлює взаємний зв'язок конструктивних та кінематичних факторів -  $(l_r - e_r) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} = (l_r + e_r) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}$  [2].

Із застосуванням у ПЗКШ декількох пар зубчастих коліс із зміщеними зубчастими вінцями встановлених послідовно, на основі попередньої залежності отримуємо вираз для визначення співвідношення між вхідним  $\varphi_{01}$  та вихідним  $\varphi_1$  кутами повороту всього ПЗКШ :

$$\varphi_1 = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \left( \frac{l_r - e_r}{l_r + e_r} \right)^k \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} \right), \quad (1)$$

де  $k$  – кількість однакових пар коліс із зміщеними зубчастими вінцями.

Поширене застосування у зубчастих передачах коліс із зубцями евольвентного профілю спонукає до необхідності використовувати перспективний для зубонарізання спосіб РКБД саме із ПЗКШ для формоутворення евольвентних зубців, незважаючи на те, що спосіб РКБД дає змогу отримати лише синусоподібний профіль зубців. Тому доцільно встановити такі параметри процесу РКБД із ПЗКШ, що забезпечать отримання модифікованого синусоподібного профілю, максимально наближеного до евольвентного. Встановлено, що максимального наближення цих профілів найпростішим способом можна досягнути зміною одного із найдоступніших до керування фактора – ексцентриситета ( $e$ ) встановлення ДФ. Характеристики синусоподібного та евольвентного профілів зубців наведено на рис. 1.

Умова сумісності згаданих профілів визначається співпаданням точок  $M_c$  та  $M_e$ , що належать відповідно модифікованому синусоподібному та евольвентному профілям. У цьому випадку

повинні бути однакові радіус-вектори точок  $M_c$  та  $M_e$  (відповідно  $R_{mc}$  та  $R_{me}$ ) та їхні центральні кути (відповідно  $\delta_c$  та  $\delta_e$ ), тобто виконуватись умови:

$$R_{me} = R_{mc} ; \quad \delta_e = \delta_c. \quad (2)$$

Отже, основне рівняння, що підлягає розгляду, має такий вигляд:

$$\delta_e - \delta_c = 0. \quad (3)$$

Зубці із синусоподібним та евольвентним профілями розташовані симетрично до осі  $OY$  нерухомої системи координат  $XOY$ .

Профіль синусоподібного зуба, що формується точкою  $M_c$ , отримують при контакті різального ребра ДФ, що повертається разом із відрізком  $OE_c$  за годинниковою стрілкою відносно центра  $O$ , та радіальному переміщенні його вздовж відрізка  $OE_c$ . Поворот відрізка  $OE_c$  рівномірний, а зміна довжини  $R_{ec}$  – нерівномірною і визначається зміною кутової швидкості ексцентриканої частини інструментальної оправки.

Координати точки  $M_c$  контакту різального ребра ДФ визначаємо за такими залежностями

$$X_{mc} = \pm R_{mc} \cdot \cos \delta_c ; \quad Y_{mc} = R_{mc} \cdot \sin \delta_c, \quad (4)$$

де  $R_{mc}$  та  $\delta_c$  – відповідно радіус-вектор та полярний кут точки  $M_c$ ; « $\pm$ » – знак « $+$ » стосується профілю на правій, а « $-$ » на лівій стороні зубця колеса.

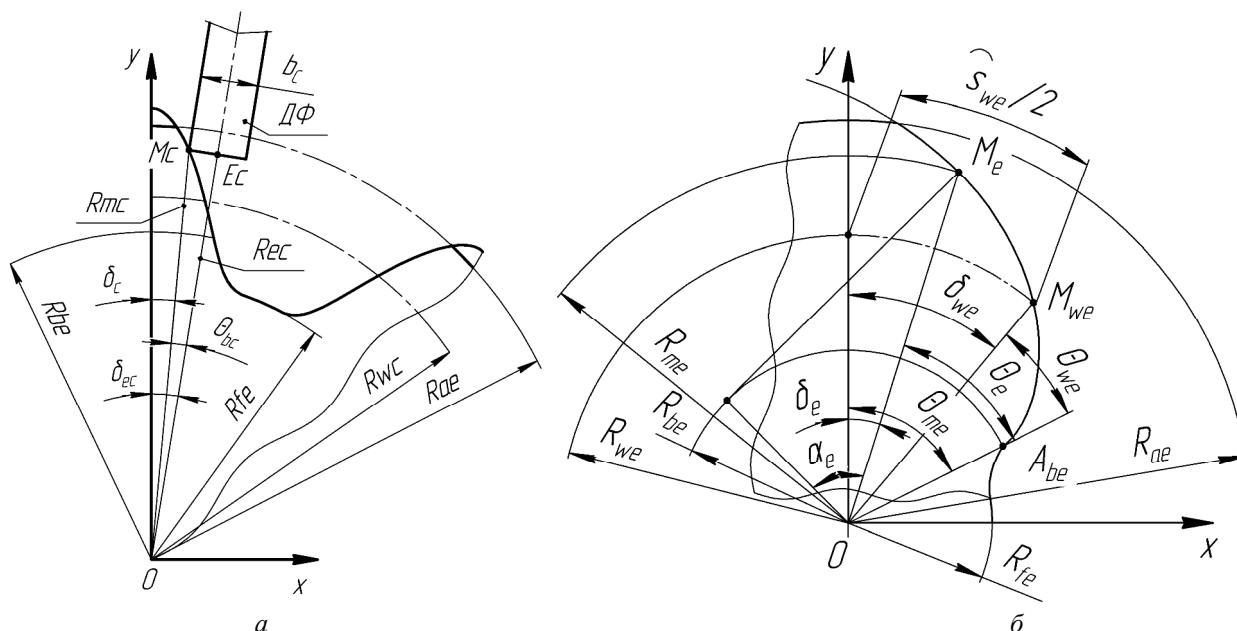


Рис. 1. Параметри профілів зубців циліндричних зубчастих коліс:  
а – синусоподібний профіль; б – евольвентний профіль

Радіус-вектор  $R_{mc}$  визначаємо за прямокутним трикутником  $M_c E_c O$ :

$$R_{mc} = \sqrt{R_{ec}^2 + \left(\frac{b_c}{2}\right)^2}, \quad (5)$$

де  $R_{ec}$  – радіус-вектор середини різального ребра ДФ;  $b_c$  – ширина різального ребра ДФ.

Радіус-вектор  $R_{ec}$  знаходимо за формулою:

$$R_{ec} = R_{wc} + e \cdot \cos \varphi_1, \quad (6)$$

де  $R_{wc}$  – радіус початкового (ділильного) кола зубців колеса синусоподібного профілю;  $e$  – ексцентриситет встановлення ДФ на інструментальній оправці.

Кут повороту  $\varphi_1$  – нерівномірний, який визначаємо за виразом (1).

Величину радіуса  $R_{wc}$  початкового (ділильного) кола визначаємо, орієнтуючись на радіуси відповідних кіл для зубців евольвентного профілю. Доцільно при нарізанні зубців синусоподібного профілю забезпечити рівність радіусів кіл западин синусоподібного  $R_{fc}$  та евольвентного  $R_{fe}$  зубців. У цьому випадку будуть різними радіуси початкових (ділильних) кіл синусоподібних та евольвентних зубців (відповідно радіуси  $R_{wc}$  та  $R_{we}$ ). Радіус ділильного (початкового) кола  $R_{wc}$  зубців синусоподібного профілю визначаємо за залежністю:

$$R_{wc} = R_{fe} + e, \quad (7)$$

де  $R_{fe}$  – радіус кола западин зубців евольвентного профілю.

Радіуси кіл  $R_{fe}$  та  $R_{we}$  розраховуємо за типовими співвідношенням:

$$R_{we} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot Z; \quad R_{fe} = R_{we} - 1,25 \cdot m. \quad (8)$$

Центральний кут  $\delta_c$  повороту радіус-вектора  $R_{ec}$  визначаємо за залежністю:

$$\delta_c = \delta_{ec} - \theta_{bc}, \quad (9)$$

де  $\delta_{ec}$  – центральний кут повороту ДФ;  $\theta_{bc}$  – центральний кут половини різального ребра ДФ.

Кут  $\delta_{ec}$  відповідає куту повороту столу зубофрезерного верстата із встановленою на ньому заготовкою зубчастого колеса і зв'язаний із кутом повороту шпинделя верстата  $\varphi_{01}$  та числом зубців  $Z$  нарізаного зубчастого колеса співвідношенням:

$$\delta_{ec} = \frac{\varphi_{01}}{Z}. \quad (10)$$

Кут  $\theta_{bc}$  визначаємо з геометричних міркувань за виразами (див. рис. 1, а):

$$\theta_{bc} = \arctg \frac{b_c}{2 \cdot R_{ec}} \quad \text{або} \quad \theta_{bc} = \arcsin \frac{b_c}{2 \cdot R_{mc}} \quad (11)$$

Застосовуючи залежності (5)–(11), отримуємо остаточні вирази для визначення полярних координат точок синусоподібного профілю (невідомий фактор – ексцентриситет  $e$ ):

$$R_{mc} = \sqrt{(R_{we} - 1,25 \cdot m + e \cdot (1 + e \cdot \cos \varphi_1))^2 + \left(\frac{b_c}{2}\right)^2}; \quad (12)$$

$$\delta_c = \frac{\varphi_{01}}{Z} - \arctg \frac{b_c}{2 \cdot (R_{wc} + e \cdot \cos \varphi_1)} \quad \text{або} \quad \delta_c = \frac{\varphi_{01}}{Z} - \arcsin \frac{b_c}{2 \cdot R_{mc}} \quad (13)$$

У нерухомій системі координат  $XOY$  (див. рис. 1, б), в якій зубець з евольвентним профілем розташований симетрично до осі  $OY$ , для точки профілю  $M_e$  радіус-вектор  $R_{me}$  та полярний кут  $\delta_e$  визначаємо за співвідношенням:

$$R_{me} = R_{we} \cdot \frac{\cos \alpha_{we}}{\cos \alpha_e}; \quad (14)$$

$$\delta_e = \theta_{me} - \theta_e, \quad (15)$$

де  $\alpha_{we}$  та  $\alpha_e$  – кути тиску в точках евольвенти відповідно на ділильному колі та розглядуваному колах (з відповідними радіусами  $R_{we}$  та  $R_{me}$ );  $\theta_{me}$  – кут між площиною симетрії зубця та початком евольвенти;  $\theta_e$  – евольвентний кут у точці евольвенти  $M_e$ .

Кут  $\theta_{me}$  знаходимо за виразом:

$$\theta_{me} = \theta_{we} + \delta_{we}, \quad (16)$$

де  $\theta_{we}$  – евольвентний кут у точці евольвенти  $M_{we}$ , що знаходиться на ділильному колі радіусом  $R_{we}$ ;  $\delta_{we}$  – центральний кут між площиною симетрії зуба та радіус-вектором  $R_{we}$  точки ділильного кола  $M_{we}$ .

Евольвентні кути  $\theta_{we}$  та  $\theta_e$ , що вимірюються від точки  $A_{be}$  початку евольвенти кола, визначаємо за залежностями:

$$\theta_{we} = \operatorname{tg} \alpha_{we} - \alpha_{we}, \quad \theta_e = \operatorname{tg} \alpha_e - \alpha_e. \quad (17)$$

Кут тиску  $\alpha_e$  евольвенти – це кут, який знаходиться між радіус-вектором  $R_{me}$  та дотичною до евольвенти в точці  $M_e$ . Кут тиску  $\alpha_e$  має змінне значення. Кут тиску  $\alpha_{we}$  у точці  $M_{we}$  на ділильному колі дорівнює нормальному куту профілю  $\alpha_{we} = 20^\circ$ .

Центральний кут  $\delta_{we}$  визначимо, враховуючи, що на ділильному колі товщина зуба  $s_{we}$  та ширина міжзубцевої западини  $e_{we}$  – однакові і залежать від кількості зубців колеса  $Z$ . Половина товщини зуба  $0,5 \cdot s_{we}$  дорівнює довжині дуги ділильного кола радіусом  $R_{we}$ , що охоплюється центральним кутом  $\delta_{we}$ , тобто  $\frac{1}{2} \cdot s_{we} = R_{we} \cdot \delta_{we}$ . Крім цього, товщина зуба  $s_{we}$  на ділильному колі дорівнює половині нормального кроку -  $s_{we} = \pi \cdot m / 2$ . Отже, кут  $\delta_{we}$  дорівнює:

$$\delta_{we} = \frac{\pi}{2 \cdot Z} \quad (18)$$

Використовуючи залежності (15)–(18), отримаємо вираз для розрахунку кута  $\delta_e$ :

$$\delta_e = (\operatorname{tg} \alpha_{we} - \alpha_{we}) - (\operatorname{tg} \alpha_e - \alpha_e) + \frac{\pi}{2 \cdot Z}, \quad (19)$$

Аналіз виразів (14) та (19) засвідчує, що повністю описати евольвенту можна за величиною радіус-вектора  $R_{me}$  або кута тиску  $\alpha_e$  в точці  $M_e$  евольвенти.

Згідно з умовою (3), застосовуючи вирази (13) та (19), отримуємо

$$(\operatorname{tg} \alpha_{we} - \alpha_{we}) - (\operatorname{tg} \alpha_e - \alpha_e) + \frac{\pi}{2 \cdot Z} - \frac{\varphi_{01}}{Z} + \arcsin \frac{b_c}{2 \cdot R_{mc}} = 0. \quad (20)$$

Використовуючи (14), встановимо вираз для визначення кута тиску  $\alpha_e$ :

$$\alpha_e = \arccos \left( \frac{R_{we}}{R_{me}} \cdot \cos \alpha_{we} \right). \quad (21)$$

Підставляючи (21) до (20) та беручи до уваги  $R_{me} = R_{mc}$ , знаходимо вихідне рівняння:

$$(\operatorname{tg} \alpha_{we} - \alpha_{we}) - \operatorname{tg} \left( \arccos \left( \frac{R_{we}}{R_{mc}} \cdot \cos \alpha_{we} \right) \right) + \arccos \left( \frac{R_{we}}{R_{mc}} \cdot \cos \alpha_{we} \right) + \frac{\pi}{2 \cdot Z} - \frac{\varphi_{01}}{Z} + \arcsin \frac{b_c}{2 \cdot R_{mc}} = 0. \quad (22)$$

Нелінійне рівняння (22) залежить лише від однієї невідомої змінної  $R_{mc}$ . Визначену за допомогою числового розв'язування змінну  $R_{mc}$  застосовуємо для розрахунку величини ексцентриситету  $e$ . Підставляючи (6) до (5), отримуємо:

$$R_{mc}^2 = (R_{fe} + e \cdot (1 + \cos \varphi_1))^2 + \left( \frac{b_c}{2} \right)^2. \quad (23)$$

Розв'язуючи квадратне рівняння (23) відносно  $e$  отримуємо (один раціональний розв'язок):

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{-2 \cdot R_{fe} + \sqrt{4 \cdot R_{mc}^2 - b_c^2}}{1 + \cos \varphi_1} \quad (24)$$

Враховуючи (8), отримуємо кінцевий вираз для розрахунку величини ексцентриситету  $e$ , за якого модифікований синусоподібний профіль найбільш наближений до евольвентного профілю для встановленого за рівнянням (22) радіуса  $R_{mc}$  точки, спільної для двох згаданих профілів:

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{-2 \cdot (R_{we} - 1,25 \cdot m) + \sqrt{4 \cdot R_{mc}^2 - b_c^2}}{1 + \cos \varphi_1}. \quad (25)$$

Числове розв'язування рівняння (22) відносно  $R_{mc}$  проводили для різних дискретних значень кута  $\varphi_{01}$  повороту шпинделя зубофрезерного верстату та кута повороту  $\varphi_1$  ексцентрикової частини інструментальної оправки ДФ, що забезпечується ПЗКШ (див. вираз (1)).

Отримання числового розв'язку рівняння (22) доцільно спростити перетворенням рівняння на ряд Тейлора в околі точки, що лежить на ділільному колі зубчастого колеса -  $R_{mc0} = R_{we}$ , застосовуючи для цього прикладну математичну програму "Maple". Наприклад, для прямозубого циліндричного зубчастого колеса з параметрами  $m = 10$  мм;  $\alpha_{we} = 20^\circ$ ; дискової фрези із :  $b_c = 5$  мм; пристрою ПЗКШ із  $k = 3$ ,  $l_1 = 72$  мм,  $e_r = 6$  мм; для кута повороту шпинделя зубофрезерного верстата, що дорівнює  $\varphi_{01} = \frac{\pi}{2}$ , визначаємо в околі точки  $R_{we}$  на основі рівняння (22), ряди Тейлора для зубчастого колеса із кількістю зубців  $Z = 18$ :

$$0,419540086 - 0,004352874829 \cdot R_{mc} - 0,000166165366 \cdot (R_{mc} - R_{we})^2 + 0,6587848291 \cdot 10^{-5} \cdot (R_{mc} - R_{we})^3 - 0,43732413 \cdot 10^{-6} \cdot (R_{mc} - R_{we})^4 = 0 \quad (26)$$

та для зубчастого колеса із кількістю зубців  $Z = 82$ :

$$0,37616551 - 0,00090261 \cdot R_{mc} - 0,81358769 \cdot 10^{-5} \cdot (R_{mc} - R_{we})^2 + 0,69996908 \cdot 10^{-7} \cdot (R_{mc} - R_{we})^3 - 0,10161712 \cdot 10^{-8} \cdot (R_{mc} - R_{we})^4 = 0 \quad (27)$$

Використовуючи (26) та (25), розраховуємо:  $R_{mc} = 95,416$  мм та  $e = 12,22$  мм., а відповідно для (27) та (25)  $R_{mc} = 416,404$  мм та  $e = 12,92$  мм.

Геометричне порівняння зубців з модифікованими синусоподібними та евольвентними профілями зображено на рис. 3. Видно, що профілі практично збігаються.

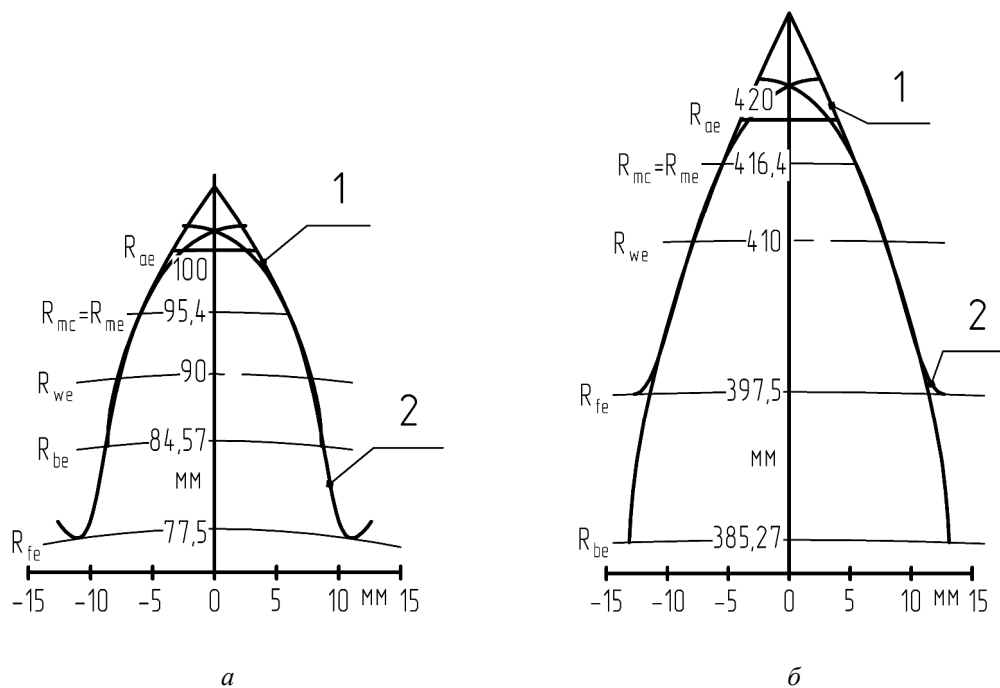


Рис. 3. Модифікований синусоподібний та евольвентний профілі зубців:  
 а -  $Z = 18$ ,  $m = 10$  мм,  $e = 12,22$  мм; б -  $Z = 82$ ,  $m = 10$  мм,  $e = 12,92$  мм  
 1 - евольвентний профіль; 2 - модифікований синусоподібний профіль

Важливою особливістю модифікованого синусоподібного профілю є те, що зуб колеса отримують із фланком. Фланкований евольвентний профіль нарізають інструментами рейкового типу (черв'ячними фрезами), які характеризуються додатковою конструктивною складністю, що

безпосередньо відображається на їх вартості. Вважають такі особливості технології зубонарізання виправданими, враховуючи забезпечувану функціональну цінність: фланковані зубці коліс підвищують плавність роботи та довговічність циліндричної зубчастої передачі, здебільшого за значної частоти обертання коліс. На відміну від евольвентних фланкованих зубців, модифіковані синусоподібні профілі на зубцях нарізаються кінематично значно простіше. Крім цього, необхідно наголосити на тому, що запропонована методика підбору технологічних та конструктивних параметрів інструментального оснащення надає можливість отримати такий зуб із модифікованим синусоподібним профілем, товщина якого не перевищує товщини зубця із евольвентним профілем, що дає змогу забезпечити вимоги до бокового зазору у зубчастій передачі, для якої виготовляють циліндричні зубчасті колеса.

**Висновки.** 1. Нарізати евольвентні зубчасті колеса можна на зубофрезерному верстаті способом радіально-колового формоутворення дисковими фрезами за безперервного обертання заготовки із обов'язковим застосуванням інструментального пристрою зміни кутової швидкості обертання ексцентрикової частини інструментальної оправки приводу дискової фрези.

2. Розроблено математичні моделі, які дають змогу розрахунково визначити ексцентриситет встановлення дискової фрези, що забезпечує отримання модифікованого синусоподібного профілю, який практично повністю збігається з необхідним евольвентним профілем зубця циліндричного зубчастого колеса та має товщину, яка гарантовано не перевищує потрібної товщини зубця з евольвентним профілем.

3. Зубець циліндричного колеса із модифікованим синусоподібним профілем отримують з фланком, що можна вважати позитивною особливістю способу радіально-колового формоутворення дисковою фрезою, оскільки фланковані зубці забезпечують підвищену плавність роботи швидкісної циліндричної зубчастої передачі.

1. Антонюк В. Е. *Современные технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес // Оборудование и инструмент для профессионалов // Серия: Металлообработка. – 2007. – № 4. – С. 6–18.* 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 // Український міжвідомчий збірник наукових праць: Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – Вип. 46. С. 135–140.* 3. Литвиняк Я. М. *Технологічні аспекти процесу радіально-колового нарізання циліндричних зубчастих коліс з динамічною зміною кутової швидкості різання / Я. М. Литвиняк // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 2012. – № 729. – С. 19–25.* 4. Литвиняк Я. М. *Моделювання процесів отримання випукло-увігнутих 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. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – № 730. – С. 57–64.* 5. Пастернак С. І., Данильченко Ю. М., Сторчак М. Г., Кривошея А. В. *Експериментальне дослідження контурної обробки зубчастих коліс дисковим інструментом // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск “Проблеми механічного приводу”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2010. – № 26. – С. 94–101.*