

ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОТРИМАННЯ ЕВОЛЬВЕНТНОГО ПРОФІЛЮ ЗУБЦІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОЛІС СПОСОБОМ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

© Литвиняк Я.М., Грицай І.Є., 2010

Наведено результати дослідження процесу радіально-колового нарізання зубців евольвентного профілю на циліндричних колесах за рахунок радіального та осового корегування положення різальних зубців у корпусі дискових інструментів. Налаштування дискових інструментів поза зубофрезерним верстатом дасть змогу підвищити технологічну гнучкість та можливість раціонального інструментального забезпечення виготовлення зубчастих коліс в автоматизованому виробництві.

The models of correction indents position in the corps of disk instrument are presented. Models describe radial, axial, angular correction. An instrument is intended for forming of indents of gear-wheels. Moving of disk instrument is executed along radial and circle direction in relation to a gear-wheel.

Постановка проблеми. Зростаючі експлуатаційні характеристики виробів із зубчастими передачами загального, транспортного машинобудування відображаються на підвищених вимогах до навантажувальної здатності, зношуваності, матеріалоемності, шуму тощо самих зубчастих передач. На функціональні показники згаданих передач безпосередньо впливає точність зубчастих коліс, яка, згідно з засадами технологічної спадковості, формується на першій, здебільшого зубофрезерній операції, яка, своєю чергою, виконується за допомогою черв'ячних фрез. Зубофрезерна операція визначає техніко-економічні показники технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс, які залежать від тривалості та високої вартості інструментів, їх відносно низької стійкості, значних витрат на загострення тощо.

Альтернативним традиційному зубофрезеруванню є новий процес виготовлення вінців циліндричних зубчастих коліс за допомогою дискових фрез, оснащених твердосплавними змінними зубцями способом радіально-колового формоутворення [1]. Процес зубонарізання здійснюється на універсальних зубофрезерних верстатах, у яких замість черв'ячної фрези використовується згадана дискова фреза і зберігаються всі властиві для черв'ячного зубофрезерування налагодження кінематичних ланцюгів самого верстату. Спосіб радіально-колового нарізання (формоутворення) зубців колеса дисковим інструментом (РКЗД) має істотні переваги і, незважаючи на існуючу інформацію, потребує для практичного застосування розроблення певних теоретичних засад, які дадуть змогу обґрунтовано призначати як технологічні параметри операції зубонарізання, так і здійснювати відповідні розрахунки для налагодження або проектування зуборізальних дискових інструментів

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язанню задачі утворення евольвентного профілю зубців циліндричних зубчастих коліс способом РКЗД присвячена попередня робота авторів [2], в якій показано, що практично забезпечити формування евольвентного, найпоширенішого профілю зубців можна лише за умови певного корегування колового руху дискового інструмента, що полягає у наданні змінної частоти обертання виконавчому органу зубофрезерного верстату (шпинделю) під час здійснення ним одного повного оберту. Однак, такий варіант реалізації операції зубонарізання потребує певної модернізації самого зубофрезерного верстату, що

в багатьох випадках є неприйнятним для підприємства. Тому пошук і обґрунтування більш простих і доступних, але достатньо ефективних шляхів застосування способу РКЗД належать до актуальних завдань підвищення техніко-економічних показників технологічного процесу виготовлення зубчастих коліс, зокрема циліндричних.

Формулювання мети досліджень. Розроблення теоретичних засад і практичних рекомендацій з раціонального проектування інструментів шляхом корегування положення різальних зубців у корпусі дискових фрез для отримання евольвентного профілю зубців циліндричних коліс способом радіально-колового формоутворення зубців.

Викладення основного матеріалу досліджень. Розроблюваний спосіб РКЗД належить до нових, перспективних технологій зубонарізання циліндричних зубчастих коліс. Основна особливість його полягає у нарізанні зубців коліс дисковою багатозубою фрезою (ДФ), що встановлена з ексцентриситетом на шпindelній оправці універсального зубофрезерного верстату (див. рис. 1). Циліндрична заготовка закріплюється на столі згаданого верстату. Заготовка та шпindelна оправка разом із ДФ отримують рівномірні, безперервні колові рухи з частотами обертання, які узгоджені між собою кінематичним ланцюгом ділення універсального зубофрезерного верстату. Розташована ексцентрично на оправці верстату ДФ почергово у радіальному напрямку заглиблюється і виходить із міжзубцевих западин заготовки зубчастого колеса, надаючи певної форми боковим поверхням зубців колеса. Різальний інструмент (ДФ) може бути споряджений змінними твердосплавними пластинами, що закріплюються у корпусі інструмента і у яких головне різальне ребро розташоване паралельно осі обертання шпindelної оправки.

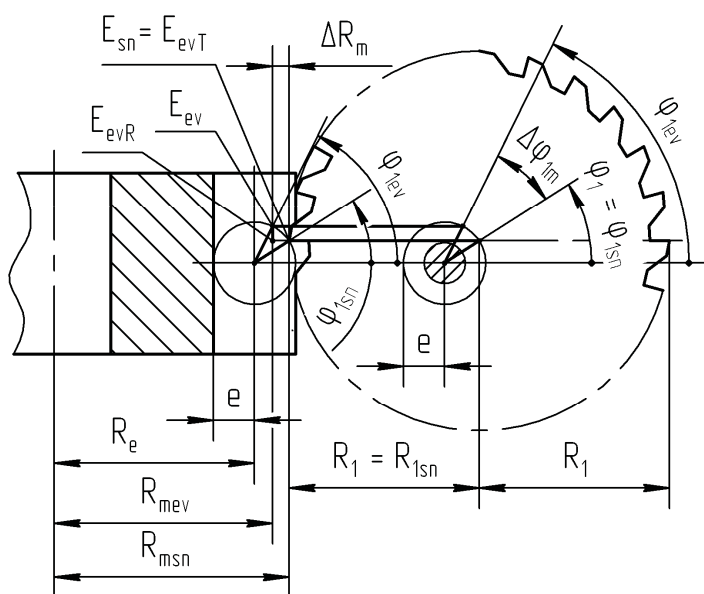


Рис. 1. Схема нарізання зубців циліндричного колеса способом РКЗД

Кінематична схема зубонарізання способом РКЗД дає змогу нарізати ДФ тільки зубці колеса з синусоїдним профілем. Однак, застосування зубчастих коліс із синусоїдним профілем зубців здебільшого неможливе, оскільки у технічній документації на відповідні вироби передбачено застосування циліндричних зубчастих коліс тільки з евольвентним профілем зубців. Тому застосувати спосіб РКЗД для нарізання зубців із евольвентним профілем потребує внесення певних коректив або у кінематику процесу нарізання зубців, або у конструкцію зубонарізного інструмента. Певні кінематичні зміни можна внести лише у ланцюг зубофрезерного верстату, який забезпечує коловий рух шпindelної оправки з метою надання їй обертання із змінною кутовою швидкістю (коловий рух столу зубофрезерного верстату змінити фізично неможливо), що було запропоновано авторами

у попередній праці [2]. Однак, більш доступним і простим у реалізації є шлях корегування положення змінних різальних зубців з подальшим їх закріпленням у корпусі ДФ.

Аналізуючи кінематичні рухи формоутворення зубців синусоїдного профілю способом РКЗД, було встановлено, що корегувати положення зубців у корпусі ДФ можна в радіальному або в осьовому або в радіально-осьовому напрямку відносно осі ДФ. Значення величин корегування можна визначити, ґрунтуючись на особливостях утворення евольвентного профілю зубця колеса різальним зубцем ДФ за умови суміщення площини симетрії головного різального зубця ДФ з площиною міжосьового перпендикуляру, оскільки осі обертання шпindelної оправки та заготовки – мимобіжні (див. рис. 2). Процес формоутворення евольвентного профілю нагадує спосіб РКЗД – зубець ДФ, безперервно контактуючи з евольвентою у точках E_i по чергово її обходить, залишаючись постійно у радіальній площині зубчастого колеса і наближаючись до його осі [2].

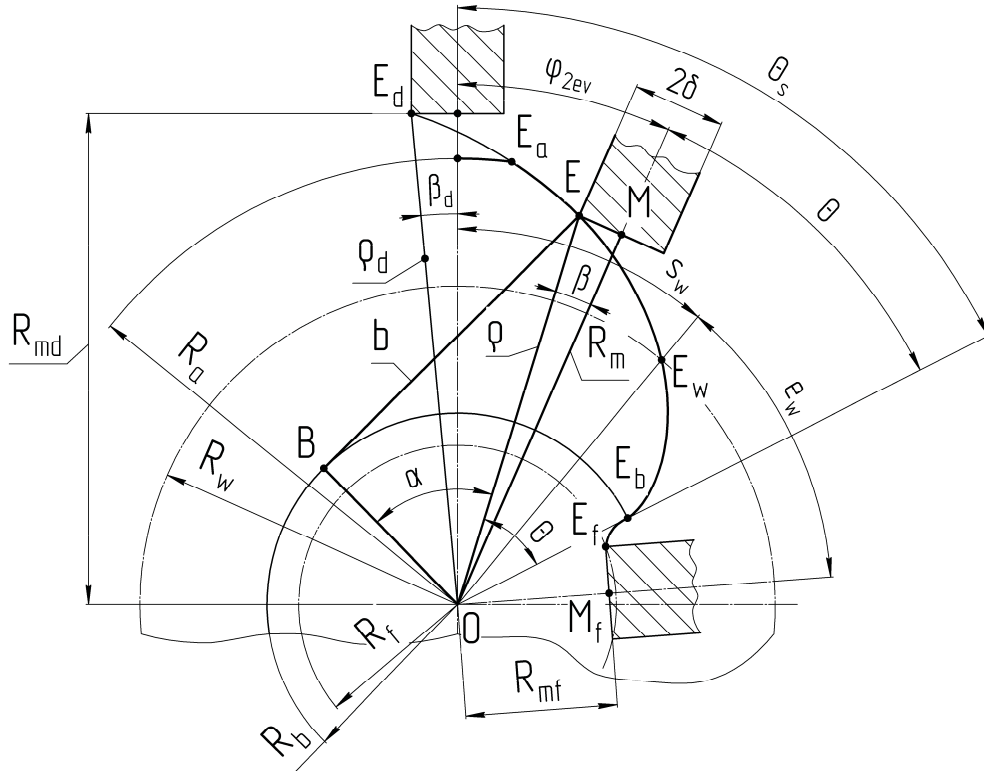


Рис. 2. Схема нарізання евольвентного профілю зубця дисковим інструментом

Початкове розташування зубця ДФ встановлюється площиною симетрії зубця колеса та віддаллю R_{md} . Кінцеве, проміжні та характерні положення головного різального ребра визначаються радіусом вершин R_a , радіусом R_b та віддаллю R_{mf} , для яких отримані такі співвідношення:

$$\theta_S = \operatorname{tg} \alpha_w - \alpha_w + \frac{s_w}{R_w} \quad \text{або} \quad \theta_S = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{z} - \frac{\pi}{9} + \operatorname{tg} \frac{\pi}{9}; \quad (1)$$

$$R_b = R_w \cdot \cos \alpha_w; \quad (2)$$

$$\rho_d = R_b \cdot \sqrt{1 + \left(\theta_S + \arccos \left(\frac{R_b}{\rho_d} \right) + \arcsin \left(\frac{\delta}{\rho_d} \right) \right)^2}; \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{\delta}{\rho} \right); \quad \beta_d = \arcsin \left(\frac{\delta}{\rho_d} \right); \quad \beta_a = \arcsin \left(\frac{\delta}{R_a} \right); \quad \beta_b = \arcsin \left(\frac{\delta}{R_b} \right); \quad (4)$$

$$\theta_b = 0; \quad \theta_a = \operatorname{tg} \left(\arccos \left(\frac{R_b}{R_a} \right) \right) - \arccos \left(\frac{R_b}{R_a} \right); \quad \theta_w = \operatorname{tg} \left(\arccos \left(\frac{R_b}{R_w} \right) \right) - \arccos \left(\frac{R_b}{R_w} \right); \quad (5)$$

$$\varphi_{2ev} = \theta_S - \theta + \beta; \quad \varphi_{2eva} = \theta_S - \theta_a + \beta_a; \quad \varphi_{2evb} = \theta_S + \beta_b; \quad (6)$$

$$\rho = \frac{R_b}{\cos(\alpha)}; \quad (7)$$

$$\rho = R_b \cdot \left(1 + g_1 \cdot \theta^{2/3} + g_2 \cdot \theta^{4/3} + g_3 \cdot \theta^2 + g_4 \cdot \theta^{8/3} + g_5 \cdot \theta^{10/3} + g_6 \cdot \theta^4\right); \quad (8)$$

$$R_m = \sqrt{\rho^2 - \delta^2}; \quad R_{md} = \sqrt{\rho_d^2 - \delta^2}; \quad R_{mb} = \sqrt{R_b^2 - \delta^2}; \quad R_{mf} = \sqrt{R_f^2 - \delta^2}, \quad (9)$$

де ρ_i – радіус вектор точки E_i евольвенти; δ – половина ширини головного різального ребра зубця ДФ; R_b – радіус основного кола; R_w – радіус ділильного (початкового) кола ($R_w = m \cdot z$); z – кількість зубців колеса; m – модуль; α – кут тиску евольвенти (кут між радіус-вектором ρ та дотичною до евольвенти в певній точці, в точці перетину евольвенти з ділильним колом $\alpha_w = 20^\circ$); θ – евольвентний кута; θ_S – евольвентний кут, який визначає положення площини симетрії зубця колеса відносно початку евольвенти на радіусі R_b ; s_w та e_w – довжина дуги ділильного кола, що відповідає половині відповідно товщині зубця та міжзубцевої западини колеса (див. рис.2); β_i – центральний кут половини різального зубця ДФ; φ_{2evi} – центральний кут повороту ДФ відносно осі зубчастого колеса; g_i – постійні коефіцієнти [2] ($g_1 = 1,040041911526$; $g_2 = 0,324506153319$; $g_3 = -0,003214285714$; $g_4 = -0,008896072779$; $g_5 = 0,003045029679$; $g_6 = -0,000206378577$); R_{mi} – радіус-вектор середини головного різального ребра зубця ДФ відносно осі обертання зубчастого колеса; ev – індекс, що засвідчує належність певного параметра до евольвентного профілю.

Необхідно зауважити, що вираз (3) належить до трансцендентних рівнянь і у запропонованій формі може бути розв’язаним з необхідною точністю, наприклад, методом простих ітерацій.

Використовуючи залежності (1)–(9), можна повністю описати евольвентний боковий профіль зубця зубчастого колеса.

Науковою новизною розроблена методика істотно відрізняється від традиційних методик, які полягають в описі утворення евольвентного профілю шляхом або колового переміщення зубонарізного інструменту у верстатному зачепленні, або повного копіювання профілю інструмента під час переміщенні останнього вздовж осі зубчастого колеса. Отримання евольвентного профілю за цією методикою ґрунтується на кінематичному копіюванні, тобто боковий профіль зубця є результатом взаємно узгоджених, змінюваних за певними закономірностями рухів різальних зубців дискового інструмента в радіальному і коловому напрямках відносно заготовки зубчастого колеса. У цьому випадку радіальний рух переважає.

Координата точки на евольвенті згідно з (8) явно залежить від евольвентного кута θ , який виконує функцію параметра. Встановити значення θ відносно центрального кута φ_{2ev} повороту ДФ достатньо складно. Тому для отримання залежності радіус-вектора ρ безпосередньо від кута φ_{2ev} доцільно скористатися виразом (6), в якому замінити θ на відоме співвідношення $\theta = \text{tg}(\alpha) - \alpha$ та підставити (7) у (4). Після нескладних перетворень отримуємо вираз (10), що відображає трансцендентне рівняння, яке тільки у такій формі може бути розв’язане методом простих ітерацій (для певного φ_{2ev} потрібно задатись початковим значенням α_i , підставити його у праву частину рівняння, розрахувати наступне значення α_{i+1} , яке згодом підставити у праву частину (10) і т. д.):

$$\alpha = \arctg \left(\theta_S - \varphi_{2ev} + \alpha + \arcsin \left(\frac{\delta}{R_b} \cdot \cos(\alpha) \right) \right). \quad (10)$$

Застосування способу РКЗД для нарізання евольвентного профілю зубців колеса потребує встановлення величини осьового зміщення (ексцентриситету) – e осі ДФ відносно осі обертання шпindelної оправки (див. рис.1). Подвійна величина $2e$ забезпечить отримання повної висоти

зубця, тобто кола западин R_f , стандартне значення якого для евольвентних циліндричних передач приймають $R_f = R_w - 1,25m$. Значення e залежить від радіуса серединного кола R_e , яке рівновіддалене від кола радіусом R_f і найбільшого можливого кола, яке доступне до нарізання ексцентрично встановленою ДФ. Цей радіус може із різних міркувань дорівнювати або радіусу R_{md} (див. (9)), або радіусу R_{mda} , який визначається за виразом:

$$R_{mda} = R_w + 1,25 \cdot m \quad (11)$$

В останньому випадку радіус серединного кола R_e збігається з радіусом ділильного (початкового) кола R_w , тобто ексцентриситет e та радіус R_e однакові:

$$R_e = R_w, \quad e = 1,25 \cdot m. \quad (12)$$

Для забезпечення певних оптимальних параметрів синусоїдного профілю зубця (наприклад, кут профілю на ділильному колі) ексцентриситет e може бути відмінним від розрахованого за виразом (12), тоді радіус R_e не збігається з R_w .

Реалізація способу РКЗД передбачає рух формотвірної точки ДФ відносно лінії серединного кола R_e по жорсткій коловій, в радіальній площині, і гвинтовій, у просторі, траєкторії, яка кінематично визначається тільки ексцентриситетом e та числом зубців z нарізованого колеса. Радіус-вектор R_{msn} синусоїдальної кривої зубчастого колеса, яка утворюється серединою різального ребра зубця ДФ – точкою M_{sn} (аналог точки M на рис. 2), визначається співвідношенням:

$$R_{msn} = R_e + e \cdot \cos(z \cdot \varphi_{2sn}), \quad (13)$$

де φ_{2sn} – центральний кут повороту зубчастого колеса (аналог кута φ_{2ev} на рис.2); sn – індекс, що засвідчує належність певного параметра до синусоїдного профілю.

Кут повороту φ_{2sn} зв'язаний з кутом повороту шпindel'ної оправки φ_{1sn} (див. рис. 1) залежністю (безпосередньо входить у (13)):

$$\varphi_{1sn} = z \cdot \varphi_{2sn}. \quad (14)$$

Радіус-вектор ρ_{snE} (аналог ρ на рис. 2) точки E_{sn} синусоїдного профілю (див. рис. 3) залежить від ширини 2δ зубця ДФ та може бути знайдений з виразу

$$\rho_{snE} = \sqrt{R_{msn}^2 + \delta^2}, \quad \rho_{snE} = \sqrt{(R_e + e \cdot \cos(z \cdot \varphi_{2sn}))^2 + \delta^2}. \quad (15)$$

Необхідно зауважити, що центральний кут, який відповідає радіус-вектору ρ_{snE} , відмінний від φ_{2sn} і може бути визначений за таким виразом – $\left(\varphi_{2sn} - \arcsin\left(\frac{\delta}{\rho_{snE}}\right) \right)$.

Враховуючи те, що спосіб РКЗД застосовується для отримання ДФ-ю евольвентного профілю, необхідно в певний конкретний момент часу забезпечити дві умови. Перша умова – рівність центральних кутів повороту заготовки зубчастого колеса при утворенні евольвенти і синусоїди – $\varphi_{2ev} = \varphi_{2sn}$ (див. рис.3). Друга умова – розміщення формотвірної точки E_{sn} головного різального ребра зубця ДФ на евольвенті. За другою умовою, точка E_{sn} повинна тоді в певний момент часу займати положення на евольвенті в точці E_{evR} чи E_{evT} . Таке розміщення точки E_{sn} (належить синусоїді) може бути реалізоване завдяки зміщенню різального зубця ДФ (тобто головного ребра зубця) в радіальному або в осьовому напрямку. Величини згаданих зміщень визначаються величинами відповідно радіальної корекції (ΔR_m) або осьової корекції (ΔT_m).

Запропонований механізм корегування практично може бути реалізований шляхом зміщення в радіальному або осьовому напрямку з подальшим закріпленням у новому положенні різального зубця в корпусі ДФ. Зміщення виконуються з обов'язковим врахуванням розташування ексцентричного зміщення e ДФ на шпindel'ній оправці.

Крім лінійного корегування положення різального зубця в корпусі ДФ, доцільно розглянути можливість корегування частоти обертання шпindelної оправки. В цьому випадку у зубофрезерному верстаті зберігається постійним співвідношення між кутовими швидкостями обертання шпindelної оправки та його столу із заготовкою зубчастого колеса, що встановлене ланцюгом ділення (див. (14)). На згадану постійну частоту обертання шпindelної оправки необхідно накласти змінну складову певного пришвидшення або сповільнення, яка може бути конструктивно отримана за допомогою відомих конструкцій механізмів або електромеханічних передач. Положення ДФ (див. рис.1), якою досягнуто при куті повороту шпindelної оправки на кут φ_{1sn} , дасть змогу отримати точку E_{sn} на синусоїдному профілі (див. рис. 3) за умови, що центральний кут φ_{2sn} повороту зубчастого колеса становить $\varphi_{2sn} = \varphi_{1sn}/z$ (у цьому випадку вважаємо, що $\varphi_{2ev} \neq \varphi_{2sn}$). У момент часу, який відповідає куту повороту φ_{2sn} , необхідно здійснити додатковий поворот шпindelної оправки на кут $\Delta\varphi_{1m}$, щоб активний профілюючий зубець ДФ зайняв положення, яке в радіальній площині колеса відповідає точці E_{ev} (див. рис. 1). Ця точка у торцевій площині колеса проектується на точку E_{evR} (див. рис. 3). Необхідно наголосити, що кут, на який була повернута заготовка зубчастого колеса, у цей момент часу залишається попереднім, незмінним і дорівнює φ_{2sn} . Отже, центральний кут повороту φ_{1ev} , на який повинна повернутись шпindelна оправка, щоб забезпечити отримання точки на евольвентному профілі, а відповідно і кутова корекція $\Delta\varphi_{1m}$, визначаються за співвідношеннями (див. рис. 1):

$$R_{mev} = R_e + e \cdot \cos(\varphi_{1ev}); \quad \Delta\varphi_{1m} = \varphi_{1ev} - \varphi_{1sn}.$$

Кутова корекція $\Delta\varphi_{1sn}$ повороту шпindelної оправки розраховується з попередніх виразів за такою залежністю:

$$\Delta\varphi_{1m} = -\varphi_{1sn} + \arccos\left(\frac{R_{mev} - R_e}{e}\right). \quad (20)$$

Конкретний приклад загального вигляду евольвентного та синусоїдних профілів наведено на рис. 4, а величини радіальної та осьової корекції – на рис. 5.

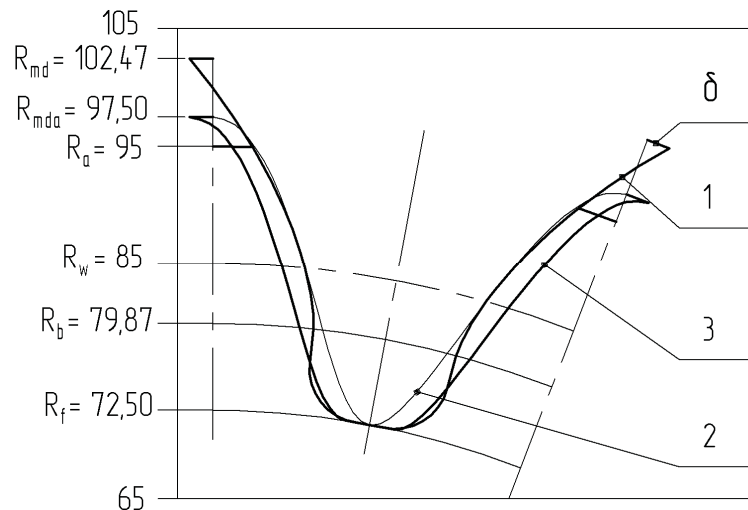


Рис. 4. Профілі зубців прямозубого зубчастого колеса:
 1 – евольвентний профіль; 2 – профіль синусоїдний, отриманий серединою головного різального ребра зубця ДФ; 3 – профіль синусоїдний, отриманий боковою вершиною головного різального ребра зубця ДФ;
 δ – половина головного різального ребра зубця ДФ
 ($m = 10\text{мм}$, $z = 17$, $e = 12,5\text{ мм}$, $\delta = 2\text{ мм}$)

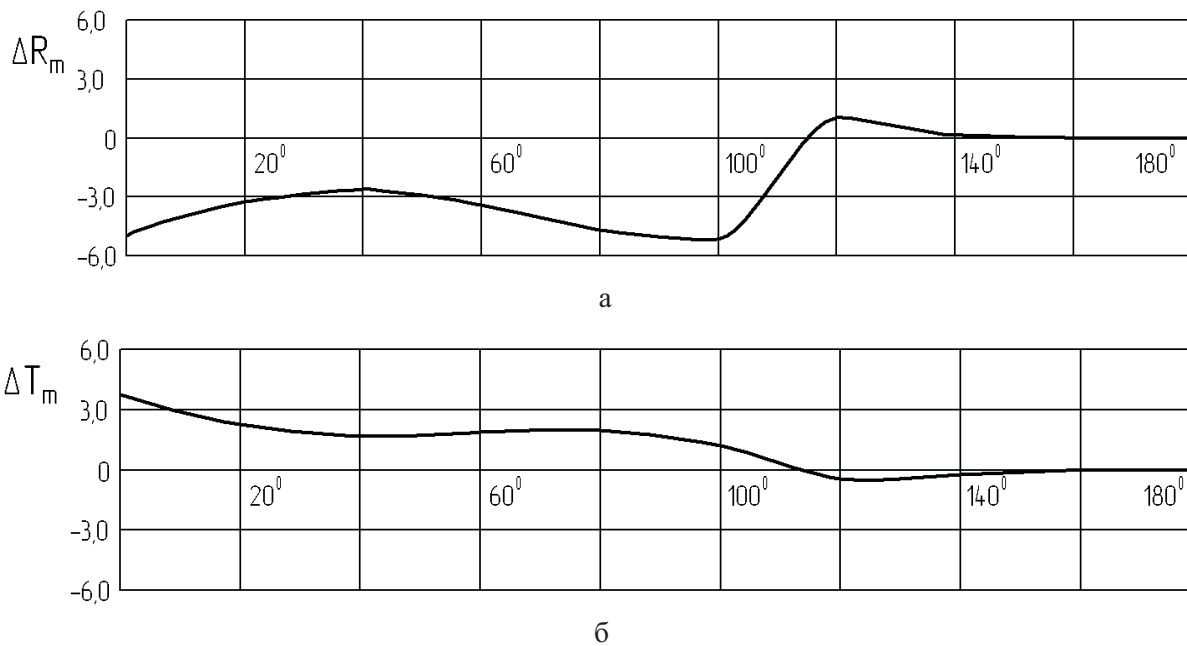


Рис. 5. Величина радіальної (а) та осьової (б) корекції положення середини головного різального ребра зубця ДФ для отримання евольвентного профілю зубця колеса способом РКЗД ($m=10\text{мм}$, $z=17$, $e=12,5\text{мм}$, $\delta=2\text{мм}$)

Висновки. Спосіб РКЗД для нарізання циліндричних зубчастих коліс завдяки закладеним потенційним можливостям, технологічній гнучкості є альтернативою існуючим, традиційним способам зубообробки. Підтверджено можливість отримання зубців евольвентного профілю шляхом внесення корекцій у розташування різальних зубців у корпусі ДФ. Напрямок і величина зміщення різальних зубців в корпусі ДФ визначається модулем, числом зубців зубчастого колеса та величинами ексцентриситету і шириною головного різального зубця ДФ. Відхилення форми бокової евольвентної поверхні зубців безпосередньо залежить від числа зубців ДФ.

1. Литвиняк Я.М. Підвищення технологічної гнучкості операцій формоутворення зубців циліндричних зубчастих коліс в автоматизованому виробництві / Я.М. Литвиняк, І.Є. Грицай, Є.М. Махоркін // Міжгалузевий збірник наукових праць. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2008. – Вип. 42: Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 157–163. 2. Литвиняк Я.М. Підвищення ефективності операцій виготовлення циліндричних евольвентних зубчастих коліс радіальним формоутворенням зубців / Я.М. Литвиняк, І.Є. Грицай // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2009. – № 642: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 18–24.