

УДК 621.922.04

Н.С. РАВСЬКА, д-р техн. наук,
О.А. ОХРИМЕНКО, канд. техн. наук, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВІД ЕВОЛЬВЕНТНОГО ПРИ ЇХ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ

В роботі досліджено вплив конструктивних параметрів черв'ячних фрез і зубчастих коліс на точність профілю зубчастого колеса. З врахуванням кінематики процесу зубофрезерування на прикладі вихідних інструментальних поверхонь архімедових і конволютних черв'ячних фрез визначені похибки профілю прямозубих зубчастих коліс, які виникають при заміні теоретично точного евольвентного черв'яка. Встановлено, що корекцією профільного кута вихідної інструментальної поверхні можна зменшити похибки профілю зубчастого колеса. За результатами досліджень запропоновано раціональні параметри кутової корекції профілю вихідної інструментальної поверхні черв'ячних фрез, що забезпечують мінімальні відхилення профілю колеса від евольвенти.

В работе исследовано влияние конструктивных параметров червячных фрез и зубчатых колес на точность профиля зубчатого колеса. С учетом кинематики процесса зубофрезерования на примере выходных инструментальных поверхностей архимедовых и конволютных червячных фрез определены погрешности профиля прямозубых зубчатых колес, которые возникают при замене теоретически точного эвольвентного червяка. Установлено, что коррекцией профильного угла исходной инструментальной поверхности можно уменьшить погрешности профиля зубчатого колеса. По результатам исследований предложены рациональные параметры угловой коррекции профиля исходной инструментальной поверхности червячных фрез, которые обеспечивают минимальные отклонения профиля колеса от эвольвенты.

The article of the design parameters of hobs and gear profile accuracy gear. In view of the kinematics of hobbing an example output of tool surfaces and buoyancy ZA, ZN worm defined error profile spur gears, which arise when replacing the theoretically precise involute(ZI) worm. It is found that the correction angle of the profile of the original surface of the tool can reduce the error profile of a gear wheel. According to the research proposed rational parameters of the profile of the original angular correction tool surfaces of hobs, which ensure minimal deviation from the involute profile of the wheel.

© *Н.С. Равська, О.А. Охріменко, 2015*

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Основою проектування черв'ячних фрез є теорія формоутворення зубчастих коліс черв'ячними фрезами [1,2]. Теорія формоутворення зубчастих коліс черв'ячними фрезами ґрунтується на багатьох припущеннях [3, 4]. Одне з них є те, що процес зубофрезерування черв'ячними фрезами розглядається як процес формоутворення плоскою рейкою на площині. Таке уявлення процесу утворення зубчастих коліс не відтворює в повній мірі процес їх зубонарізання, що і є одною з причин відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного. Проте кількісна оцінка цього відхилення не досліджена.

Визначення та дослідження впливу на її значення конструктивних параметрів коліс та черв'ячних фрез при розгляді ідеального процесу зубофрезерування з врахуванням кінематики цього процесу черв'ячними фрезами з архімедовим чи конвалютним черв'яком дозволить на стадії проектування встановлювати можливу точність зубчастих коліс в залежності від параметрів коліс та черв'ячних фрез і розробляти шляхи підвищення їх точності.

Ця задача для циліндричних прямозубих коліс вирішується в цій роботі.

МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ полягає в визначенні впливу параметрів зубчастих коліс та черв'ячних фрез на точність циліндричних прямозубих коліс для подальшої розробки методів і способів підвищення їх точності.

ПОПЕРЕДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Серед існуючих методів аналізу формоутворення зубчастих коліс найбільш поширеним є метод порівняння перерізу теоретично точного з існуючим [5]. У цьому випадку переріз вибирається в площині дотичній до основного циліндра евольвентного черв'яка, для якого переріз такого черв'яка буде прямолінійним. При цьому вважається, що похибки по нормалі переносяться на профіль зуба колеса. Недоліком такого методу є

те, що він не враховує обертання фрези та колеса навколо своїх осей та рух фрези вздовж колеса.

В роботі [6] при порівнянні черв'яків у нормальному перерізі за сталу береться прямобічна рейка, в той час як для евольвентного черв'яка прямолінійний профіль буде в перерізі дотичному до основного циліндра, що безумовно це припущення впливає на похибки профілю колеса.

Відомі також методи визначення відхилень, в основу яких покладено метод Олів'є, згідно якого спочатку визначається рейка, спряжена із черв'яком, а потім колесо спряжене з рейкою.

У даному випадку рейка розглядається плоскою, хоча процес зубофрезерування здійснюється в просторі. Разом з тим при визначенні відхилень профілю необхідно враховувати всі рухи, які в просторі здійснюють фреза та нарізуване колесо.

В роботах [2, 6, 7] для вирішення задачі відхилень профілю колеса від евольвентного з врахуванням всіх рухів, що здійснюються в процесі зубонарізання виведені рівняння контакту для архімедового та конволютного черв'яків:

$$R_2 = m_{20s} \cdot m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_1(t, u); b_u = b_f; i_{12} = \frac{f_{01}}{f_{02}} = \frac{k_f}{Z_k};$$

$$m_{01} = \begin{pmatrix} \cos f_{01} & -\sin f_{01} & 0 & 0 \\ \sin f_{01} & \cos f_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; m_{20} = \begin{pmatrix} \cos b_u & 0 & \sin b_u & 0 \\ 0 & 1 & 0 & A_0 \\ -\sin b_u & 0 & \cos b_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$m_{20f} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i_{12}f_{01}) & -\sin(i_{12}f_{01}) & 0 \\ 0 & \sin(i_{12}f_{01}) & \cos(i_{12}f_{01}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; m_{20s} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & s_{02} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$NV_{f_i} = \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial t} \\ \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial u} \\ \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial f_{01}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial f_{01}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial f_{01}} \end{array} \right| = 0$$

$$NV_{s_i} = \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial t} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial t} \\ \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial u} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial u} \\ \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Xi}(t, u))}{\partial s_{02}} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Yi}(t, u))}{\partial s_{02}} & \frac{\partial(m_{20l} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R_{1Zi}(t, u))}{\partial s_{02}} \end{array} \right| = 0 \quad ,(1)$$

де f_{01} – кут повороту фрези, f_{02} – кут повороту колеса, s_{02} -переміщення фрези вздовж осі колеса, Z_k – кількість зубів нарізає мого колеса, b_u – кут установки фрези, b_f – кут нахилу гвинтової лінії витків фрези, i_{12} – передаточне відношення фреза-колесо, k_f – кількість заходів фрези, A_0 – міжосьова відстань, R_2 - радіус вектор пов'язаний з зубчастим колесом, $R_1(u, t)$ - радіус вектор пов'язаний з вихідною інструментальною поверхнею (ВІП) фрези, u, t – незалежні параметри, що описують ВІП фрези, m_{01} – матриця повороту фрези, m_{20} – матриця розвороту фрези і встановлення міжосьової відстані, m_{20f} – матриця повороту колеса, m_{20s} – матриця руху фрези вздовж осі колеса.

$$R_1(u, t) = \begin{pmatrix} u \cos a_{01} \cos t - \sin b_{f1} \sin t \cdot (A_1 - u \cdot \sin a_{01}) \\ u \cos a_{01} \sin t + \sin b_{f1} \cos t \cdot (A_1 - u \cdot \sin a_{01}) \\ p_f \cdot t - \cos b_{f1} \cdot (A_1 - u \cdot \sin a_{01}) \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де a_{01} – кут нахилу твірною профілю ВІП фрези, b_{f1} – кут розташування площини в якій розташовано твірну профілю ВІП фрези, p_f – гвинтовий параметр ВІП фрези, A_1 – постійний параметр, що відповідає за

симетричне розташування витка ВІП фрези відносно міжосьового перпендикуляра (рис. 1).

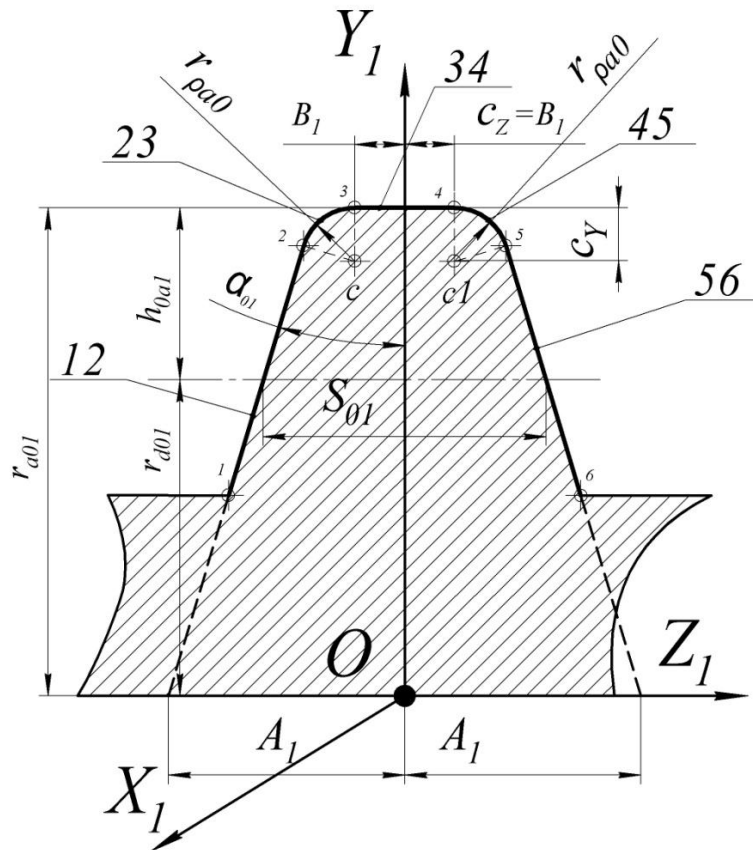


Рисунок 1 – Твірний профіль вихідної інструментальної поверхні стандартної черв'ячної фрези

На основі цих рівнянь можна визначити відхилення профілю зуба колеса від евольвенти в залежності від параметрів колеса і черв'ячної фрези.

В роботі [2] показано, що за рахунок раціонального вибору кута профілю вихідного утворюючого контуру можна підвищити точність виготовлення зубчастих коліс.

Тому в даній статті приведені дослідження відхилення профілю зубів коліс в теоретично точною для стандартних черв'ячних фрез і фрез з коректованим профілем вихідної інструментальної поверхні для архімедовим і конволютних черв'яків.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВІД ЕВОЛЬВЕНТИ

В основу розрахунків відхилення профілю зубчастих коліс покладені рівняння (1 та 2).

Аналіз цих рівнянь показує, що профіль зубчастих коліс при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами з врахуванням кінематики цього процесу перш за все залежить від кута профілю вихідного утворюючого контуру.

На рис. 2 наведена залежність зміни оптимальних кутів утворюючого контуру фрез модулем $m=5\text{мм}$ та $m=10\text{мм}$. З конволютних та архімедовим черв'яком при формоутворенні прямозубих зубчастих коліс.

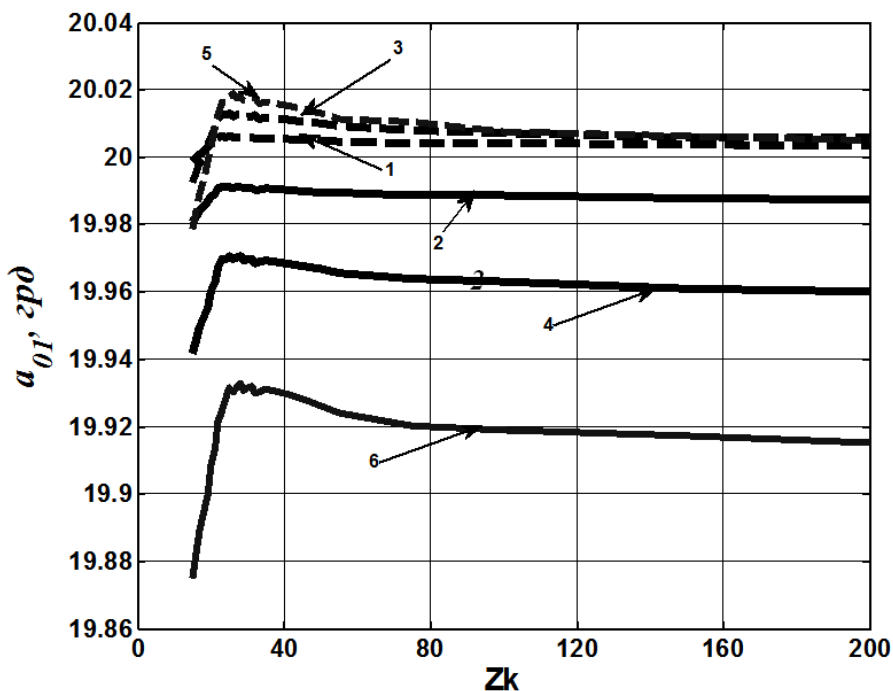


Рисунок 2 - Кути вихідного інструментального контуру a_{01} ВІП фрези, що забезпечують мінімальні відхилення профілю прямозубого зубчатого колеса від евольвенти f_f в залежності від кількості зубів нарізаємого колеса Z_k :

- 1 – $m=5$, діаметр $d_a=100$, архімедова, 2 – $m=5$, $d_a=100$, конволютна,
 3 – $m=10$, $d_a=150$, архімедова, 4 – $m=10$, $d_a=150$, конволютна,
 5 – $m=20$, $d_a=250$, архімедова, 6 – $m=20$, $d_a=250$, конволютна

Як показують наведені залежності оптимальні кути утворюючого контуру в порівнянні із стандартним номінальним контуром для коліс з конволютним черв'яком зменшуються, для фрез з архімедовим – збільшується, при чому зі збільшенням модуля відхилення від номінального профілю збільшується.

Розглянемо відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного при їх зубофрезеруванні стандартними черв'ячними фрезами та фрезами зі спроектованим профілем (рис. 3).

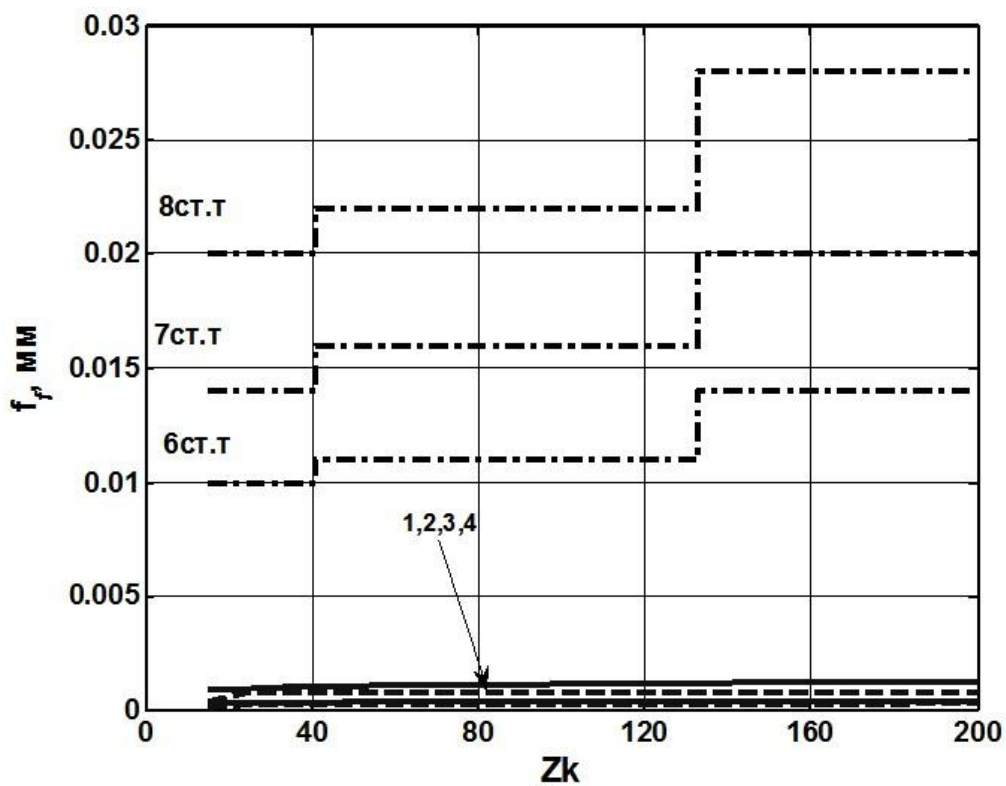


Рисунок 3 – Розрахункові відхилення профілю зубчастих коліс f_f від евольвентного при їх зубофрезеруванні стандартними черв'ячними фрезами від кількості зубів нарізаємого колеса Z_k :

- 1 – $m=3$, діаметр $d_a=80$, архімедова, 2 – $m=3$, $d_a=80$, конволютна,
- 3 – $m=3$, $d_a=112$, архімедова, 4 – $m=3$, $d_a=112$, конволютна

З рис. 3 видно, що при зубофрезеруванні зубчастих коліс модулем $m=3\text{мм}$, з врахуванням кінематики процесу не залежить від кількості зубів, відхилення, від профілю відповідають 6-й системі точності. В зв'язку з цим кут вихідного контуру коректувати не потрібно.

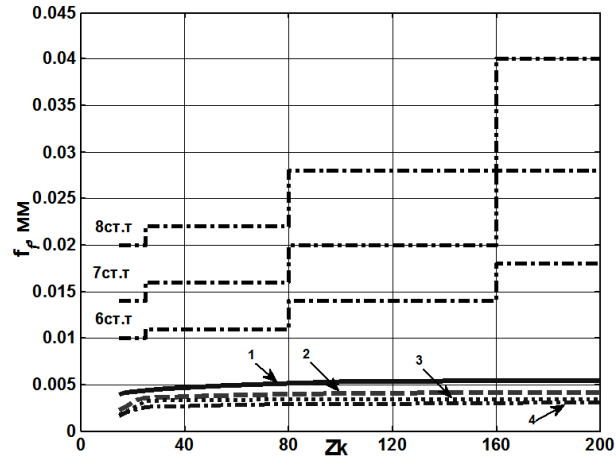
На рис. 4 наведені результати відхилення профілю зубчастих коліс від евольвентного при їх зубофрезеруванні черв'ячними фрезами зі стандартними скоректованим кутом профілю вихідного контуру для модулів 5, 10, 20 мм.

За розрахунками отримуємо, що при корекції кута профілю ВІП фрези до 30% можна зменшити відхилення профілю колеса від теоретично точного для модулів 5-20мм. при використанні ВІП фрези на базі конволютних черв'яків, для ВІП на базі архімедових черв'яків підвищення точності менше приблизно 15%. Для фрез модулем 5мм розрахункове підвищення точності дозволяє отримати похибку профілю колеса на $1/3$ від допуску на 6 ступінь точності профілю зубчастого колеса, яку за рекомендаціями відносять до похибок інструменту, а все інше до похибок технологічної системи (рис. 4 а).

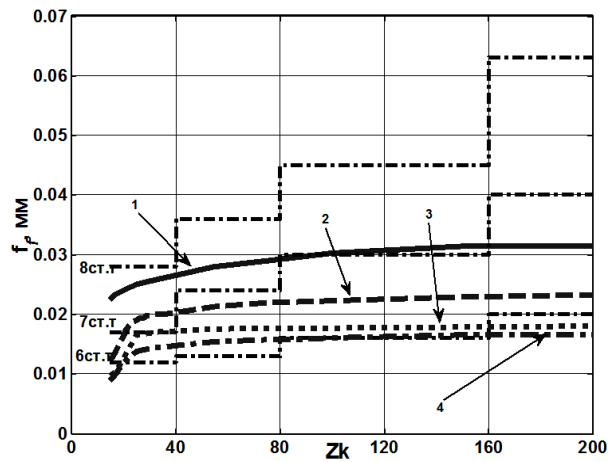
Для модуля 10мм тільки архімедовий черв'як з коректованим кутом профілю для 8 ступені точності профілю дозволяє отримати похибку профілю колеса на $1/3$ від допуску на точність колеса. Конволютний черв'як з коректованим кутом профілю за розрахунками дає можливість отримати похибку тільки на $2/3$ від допуску на 8 ступінь точності колеса по профілю для чисел зубів коліс до 160. Гарантовано розрахункова похибка профілю колеса від $1/3$ допуску на точність буде при формоутворення зубчастих коліс с числом зубів 160 і більше(рис. 4 б).

Для 20 мм використовуючи тільки корекцію профілю не можливо забезпечити розрахункову точність відповідно до допуску на точність профілю зубчастого колеса, для такого випадку необхідно рекомендувати профілювати такі фрези на більшому діаметрі, однак діаметр 250 мм, який використовувався в розрахунках згідно стандарту на суцільні фрези є граничним. Для підвищення точності профілю зубчастих коліс модулем 20 мм можна рекомендувати використовувати ламаний профіль черв'яка [2].

4.а)



4.б)



4.в)

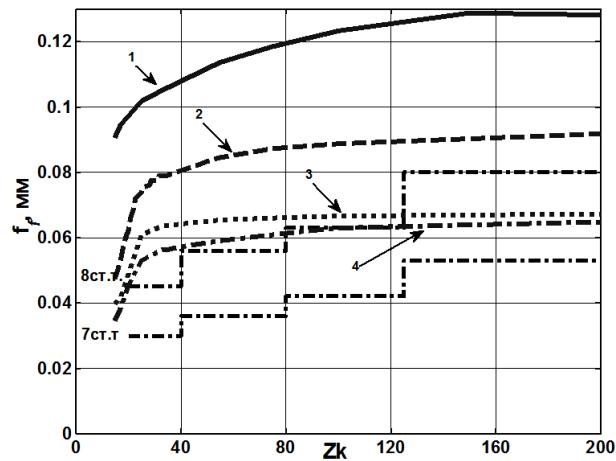


Рисунок 4 – Розрахункові відхилення профілю зубчастих коліс f_f від евольвентного при їх зубофрезеруванні ВПІ стандартних черв'ячних фрез та з скоректованим кутом профілю в залежності від кількості зубів нарізаемого колеса Z_k , 1 – стандартний кут профілю конволютний черв'як, 2 – з коректований кут профілю конволютний черв'як, 3- стандартний кут профілю архімедовий черв'як, 4- з коректований кут профілю архімедовий черв'як: 4а) – $m=5$, діаметр $d_a=100$, 4б) – $m=10$, $d_a=150$, 4в) – $m=20$, $d_a=250$

ВИСНОВОК

В роботі розглянуто вплив параметрів зубчастих коліс та черв'ячних фрез на точність циліндричних прямозубих коліс при їх формоутворенні.

Встановлено, що при стандартних кутах профілю ВІП фрези похибка профілю зубчастого колеса зростає зі збільшенням числа зубів колеса. На прикладі формоутворення прямозубих зубчастих коліс отримано, що корекція кута профілю ВІП фрези є найбільш ефективна в діапазоні модулів більше 5-10 мм для конволютних черв'ячних фрез.

Список використаних джерел: 1. *Родин П.Р.* Основы проектирования режущих инструментов/ *П.Р. Родин* – К: Вища школа, 1990-424с. 2. *Богуслаев В.О.* Формоутворення черв'ячних фрез / *В.О. Богуслаев, Н.С. Равська Н.С., О.Я. Качан, К.Б. Балушок, В.Ф. Мозговой, О.А. Охріменко* – Запоріжжя вид. ВАТ "Мотор Січ", 2007 – 179с. 3. *Литвин Ф.Л.* Теория зубчатых зацеплений / *Ф.Л. Литвин* – М: Наука, 1968 – 586с. 4. *Люкишин В.С.* Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов – М: Машиностроение, 1967 – 372 с. 5. *Сахаров Г.Н.* Металлорежущие инструменты / *Сахаров Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л., Гречишников В.А., Киселев А.С.* – М: Машиностроение, 1989 – 328с. 6. *Охріменко О.А.* Формоутворення поверхні зубчастих косозубих зубчастих коліс при зубофрезеруванні.//Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №31, 2013 С.38-46. 7. *Охріменко О.А.* Формоутворення прямозубих зубчастих коліс конічними черв'ячними фрезами.// Процеси технології обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць. ЖДТУ №12. – Житомир 2012 – С. 98-107.

Bibliography (transliterated): 1.Rodin P.R. Osnovy proektirovaniya rezhushchih instrumentov/ P.R. Rodin – K: Vishha shkola, 1990-424s. 2.Boguslaev V.O. Formoutvorennya cherv'yachnih frez / V.O. Boguslaev, N.S. Rav'ska N.S., O.Ja. Kachan, K.B. Balushok, V.F. Mozgovoj, O.A. Ohrimenko – Zaporizhzhja vid. VAT "Motor Sich", 2007-179s. 3.Litvin F.L. Teorija zubchastyh zaceplenij / F.L. Litvin – M: Nauka, 1968-586s. 4.Ljukishin V.S. Teorija vintovyh poverhnostej v proektirovanii rezhushchih instrumentov – M: Mashinostroenie, 1967-372s. 5. Saharov G.N. Metallorezhushchie instrumenty / Saharov G.N., Arbuzov O.B., Borovoj Ju.L., Grechishnikov V.A., Kiselev A.S. – M: Mashinostroenie, 1989-328s. 6.Ohrimenko O.A. Formoutvorennya poverhni zubchastih kosozubih zubchastih kolis pri zubofrezeruvanni.//Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k, vip. №31, 2013 С.38-46. 7. Ohrimenko O.A. Formoutvorennya prjamozubih zubchastih kolis konichnimi cherv'yachnimi frezami.// Procesi tehnologii obrobki v mashinobuduvanni. Zbirnik naukovih prac'. ZhDTU №12 Zhitomir 2012 S98-107.