

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-37>

УДК 621.664

ЩЕРБИНА КИРИЛ

Центральноукраїнський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1665-7686>e-mail: kir2912s@ukr.net**ЗАЙКА АНДРІЙ**

Центральноукраїнський національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0009-2828-9751>e-mail: zaiika_andrii@ukr.net**ЗАЙКА СЕРГІЙ**

Центральноукраїнський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7444-9706>e-mail: borodavichus@gmail.com**МАЖАРА ВІТАЛІЙ**

Центральноукраїнський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7451-3798>e-mail: majara@ukr.net**СКІБІНСЬКИЙ ЯРОСЛАВ**

Центральноукраїнський національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-1242-0327>e-mail: varoskibik@gmail.com

УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ НАРІЗАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИХ КОЛІС ЗБІРНИМИ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ З ПОДІЛЕНИМ НА ДВІ ЧАСТИНИ ПРОФІЛЕМ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ РЕЙКИ

Розв'язання наукової задачі управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини профілем інструментальної рейки сприятиме розширенню застосування такого металорізального інструмента в умовах сучасного верстатобудування.

Застосування на практиці розроблених черв'ячних фрез з поділенням профілем інструментальної рейки на дві частини по висоті для обробки черв'ячних коліс верстатного обладнання дає змогу підвищити як продуктивність механічної обробки так і досягнути точності достатньої для застосування їх у верстатобудуванні.

В статті проаналізовано відомі шляхи управління точністю нарізання черв'ячних коліс черв'ячними фрезами та методи їх нарізання, а також проаналізовано відомі конструкції збірних черв'ячних повнопрофільних фрез та з поділенням профілем інструментальної рейки. Досліджено особливості поділення профілю інструментальної рейки на дві частини по висоті. Розроблено нову схему поділення профілю інструментальної рейки збірних черв'ячних фрез. Запропоновано нове рівняння перекриття між зубцями першого та другого проходів, яке враховує радіус заокруглення вершин зубців черв'ячних фрез. Розроблено нове поділення профілю інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез. Аналітично визначено величину огранювання зубців черв'ячних коліс, що оброблюватимуться новими збірними черв'ячними фрезами. Визначено мінімальну кількість інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез, що на етапі проектування різального інструменту дає можливість управляти точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини по висоті профілем інструментальної рейки. Підтверджено можливість управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини по висоті профілем інструментальної рейки на етапі проектування різального інструменту

Ключові слова: збірна черв'ячна фреза, інструментальна рейка, черв'ячне колесо, верстатне обладнання, різальний інструмент.

SHCHERBYNA KYRYL**ZAIIKA ANDRII****ZAIIKA SERHII****MAZHARA VITALII****SKIBINSKYI YAROSLAV**

Central Ukrainian National Technical University

CONTROLLING THE ACCURACY OF CUTTING OF WORM WHEELS WITH ASSEMBLED WORM MILLS WITH TWO PARTS OF THE TOOL RAIL PROFILE

Solving the scientific problem of controlling the accuracy of cutting worm wheels with prefabricated worm cutters with a tool rail profile divided into two parts will contribute to the expansion of the use of such a metal cutting tool in the conditions of modern machine tool construction.

The practical use of developed worm cutters with a divided profile of the tool rail into two parts in height for processing worm wheels of machine tool equipment makes it possible to increase both the productivity of mechanical processing and to achieve accuracy sufficient for their use in machine tool construction

The article analyzes known ways of controlling the accuracy of cutting worm wheels with worm cutters and methods of cutting them, as well as analyzes known designs of prefabricated worm full-profile cutters and those with a divided tool rail profile. The features of dividing the tool rail profile into two parts in height have been studied. A new scheme for dividing the tool rail profile of prefabricated worm mills has been developed. A new equation for the overlap between the teeth of the first and second passes has been proposed, which takes into account the radius of rounding of the tops of the teeth of worm mills. A new equation for the overlap between the teeth of the

first and second passes is proposed, which takes into account the radius of rounding of the tops of the teeth of worm cutters. A new division of the profile of the tool rails of prefabricated worm cutters is developed. The amount of faceting of the teeth of worm wheels, which will be processed by new prefabricated worm cutters, is analytically determined. The minimum number of tool rails for prefabricated worm cutters has been determined, which at the cutting tool design stage makes it possible to control the accuracy of cutting worm wheels with prefabricated worm cutters with a tool rail profile divided into two parts in height. The possibility of controlling the accuracy of cutting worm wheels by prefabricated worm cutters with a tool rail profile divided into two parts in height at the stage of designing the cutting tool has been confirmed.

Keywords: prefabricated worm cutter, tool rail, worm wheel, machine tool, cutting tool.

Стаття надійшла до редакції / Received 06.03.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.04.2025

Постановка проблеми

Розробка нових конструкцій верстатів та розширення технологічних можливостей існуючих, розвиток та розширення верстатного парку висуває нові вимоги щодо точності, довговічності черв'ячних передач та головного їх силового параметру – навантажувальної здатності.

Черв'ячні передачі у верстатобудуванні використовуються як для здійснення точних кутових переміщень, так і для забезпечення точного безперервного переміщення, пов'язаного з рухом інших елементів системи. Різальним інструментом для чистової обробки черв'ячних коліс зазвичай є чистова черв'ячна фреза класу точності А або прецезійна черв'ячна фреза класу точності АА.

Одним з шляхів підвищення точності обробки є застосування систем управління точністю механічної обробки як на етапі проектування різального інструмента, так і в процесі самої механічної обробки. Відповідно, дослідження в даному напрямку є актуальним науковим завданням.

Аналіз досліджень та публікацій

Поява нових результатів досліджень дає можливість по новому поглянути на відомі речі. Так, в роботах Охріменка запропоновані черв'ячні фрези, що утворені лінією загального положення [1, 2]

Такі черв'ячні фрези мають раціональну геометрію ріжучої частини та точність не нижчу за точність стандартних черв'ячних фрез.

В роботах професора Грицяя та Литвиняка запропоновано спосіб поділення інструментальної рейки на дві частини по висоті. Черв'ячні фрези з таким поділенням мають більше число зубців та дозволяють використовувати більш інтенсивні режими різання [3, 4, 5]

В роботах Ковришкіна запропоновано поділити інструментальну рейку на три частини по висоті і отримати ще більшу кількість зубців. Зокрема, запропоновано поділення профілю рейки по висоті на три частини для трьох послідовних проходів, причому для першого проходу зубці відповідають профілю ніжки зубців рейки нормального початкового контуру, а зубці для третього проходу відповідають головці зубців профілю нормального початкового контуру. Зубці для першого і другого проходів мають перекриття на величину 0,25 від модуля [6, 7, 8]. Саме цей спосіб поділення інструментальної рейки був взятий за основу для подальших досліджень поодиноким випадку черв'ячних фрез Гончарова, коли в торцювому перерізі передня поверхня утворена прямою лінією.

Перед проведенням досліджень було враховано те, що в своїй роботі Гончаров розглядав затилювання своїх фрез трьома способами: по зубу, по западині та роздільним затилюванням. А в нашому випадку спосіб затилювання по зубу реалізується тільки з використанням трьох шліфувальних кругів, оскільки висота зубців для першого другого та третього проходів є різною, і тому не розглядається.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини по висоті профілем інструментальної рейки шляхом визначення на етапі проектування необхідних для цього параметрів різального інструменту.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі задачі: дослідити особливості поділення профілю інструментальної рейки на дві частини по висоті; розробити нову схему поділення профілю інструментальної рейки збірних черв'ячних фрез; визначити та дослідити величину огранювання зубців черв'ячних коліс; визначити мінімальну кількість інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез.

Дослідження особливостей поділення профілю інструментальної рейки на дві частини по висоті.

Для однопрофільних черв'ячних фрез радіус заокруглення головки зубців визначається в залежності від класу точності фрези.

Для черв'ячних передач верстатного обладнання є нормаль верстатобудування Н24-5, яка визначає характеристики цих передач, що суттєво відрізняються від черв'ячних передач загально машинобудівного призначення підвищеними значеннями коефіцієнту діаметру черв'яка.

Для гарантованого перекриття на бокових крайках, необхідно розробити нову схему поділення профілю інструментальної рейки збірних черв'ячних фрез рис. 1.

Враховуючи, що модуль є масштабним фактором отримаємо нове значення перекриття між зубцями першого та другого проходів:

$$e = \rho_{a0} + 0,05m. \quad (1)$$

Тобто, висота нової рейки, яка збігається з висотою h_0 зубця повно профільної фрези становитиме:

$$h_0 = h_{01} + h_{02} - e, \quad (2)$$

де h_{01} – висота зубця першого проходу;

h_{02} – висота зубця першого проходу.

Тоді, висота зубця першого проходу визначатиметься так:

$$h_{01} = \frac{h_0}{2} + \rho_{a0} + 0,05m. \quad (3)$$

Тоді, висота зубця другого проходу визначатиметься так:

$$h_{02} = \frac{h_0}{2}. \quad (4)$$

Зв'язок з висотою зубця повно профільної фрези буде таким:

$$h_0 = h_{01} + h_{02} - e. \quad (5)$$

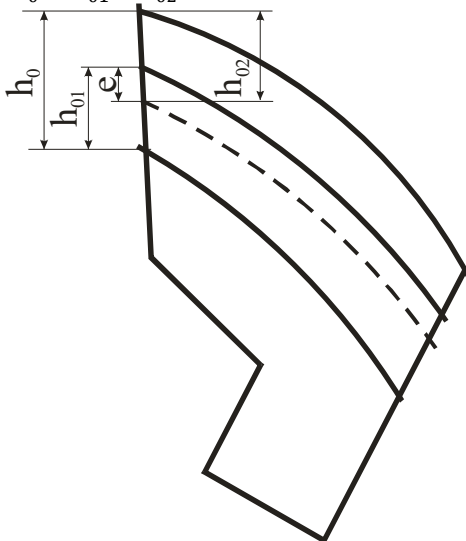


Рис. 1. Нова схема поділення профілю інструментальної рейки збірних черв'ячних фрез на дві частини по висоті

Визначення величини огранювання зубців черв'ячних коліс.

За методикою досліджень після відповідних математичних перетворень отримаємо рівняння для визначення величини огранювання зубців черв'ячних коліс:

$$\Delta f_2 = \frac{1}{2} \sqrt{4R_x^2 - [mz_2 \cos(\alpha_0)]^2} \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi N}{z_0 z_2}\right)} - 1 \right], \quad (6)$$

де z_0 – число зубців черв'ячної фрези;

z_1 – число витків черв'яка;

z_2 – число зубців черв'ячного колеса;

R_x – радіус поточної точки на зубці черв'ячного колеса;

N – найбільший дільник числа витків черв'яка та кількості зубців черв'ячного колеса.

Межі зміни радіуса поточної точки на зубці черв'ячного колеса:

$$R_x = R_{f2} \dots R_{aM}, \quad (7)$$

де R_{f2} – радіус западини зубців черв'ячного колеса;

R_{aM} – найбільший радіус вершин зубців черв'ячного колеса.

Визначення мінімальної кількості інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез.

Величина допуску на відхилення профілю черв'ячного колеса δf_2 внаслідок огранювання визначається так:

$$\delta f_2 = 0,33f_{f2}, \quad (8)$$

де f_{f2} – величина допуску на похибку профілю зуба черв'ячного колеса (регламентовано ГОСТ 3675-81).

Для повно профільних черв'ячних фрез мінімальна кількість зубців, що забезпечує потрібне значення величини f_{f2} допуску на похибку профілю зуба черв'ячного колеса за ГОСТ 3675-81 дорівнює:

$$z_0 = \frac{\pi\sqrt{3}}{2} \frac{N}{z_2} \sqrt{\frac{D_{aM} \sin(\alpha_{aM})}{f_{f2}}}. \quad (9)$$

Після відповідних математичних перетворень отримаємо:

$$z_0 = \frac{\pi\sqrt{3}}{2} \frac{N}{z_2} \sqrt{\frac{2R_{aM} \sqrt{1 - \left[\cos\left(\frac{mz_2 \cos(\alpha_0)}{2R_{aM}}\right) \right]^2}{f_{f2}}}. \quad (10)$$

Саме (10) визначає мінімальну кількість інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез, що забезпечує потрібне значення величини f_{f2} допуску на похибку профілю зубу черв'ячного колеса за ГОСТ 3675-81.

Дослідження управління точністю механічної обробки збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини по висоті профілем інструментальної рейки черв'ячних коліс верстатного обладнання

Відомо, що для черв'ячних передач верстатного обладнання рекомендовані такі передаточні відношення: для універсальних верстатів $i = \frac{1}{43}$; для верстатів середніх моделей $i = \frac{1}{96}$.

Зупиняємось на передаточному відношенні $i = \frac{1}{43}$. Тобто, число витків черв'яка приймаємо $z_1 = 1$, а число зубців черв'ячного колеса приймаємо $z_2 = 43$.

Передаточне число проектованої черв'ячної передачі становить $u = 43$.

Стосовно модуля черв'ячної передачі відомо, що ефективно скористатися засобами вимірювання черв'ячної передачі можна коли її модуль не нижчий за 3 мм. Зупиняємось на модулі $m = 3$ мм.

Коефіцієнт діаметру черв'яка приймаємо за нормаллю верстатобудування Н24-5:

Для обробки чистовою фрезою класу точності А, приймаємо $q = 17$

Відповідні розрахунки та побудову графіків для обох варіантів проводимо в середовищі MATLAB. На рис. 2 – 6 зображено результати роботи програми. Приймаємо число зубців черв'ячної фрези $z_0 = 9; 10; 11; 12$

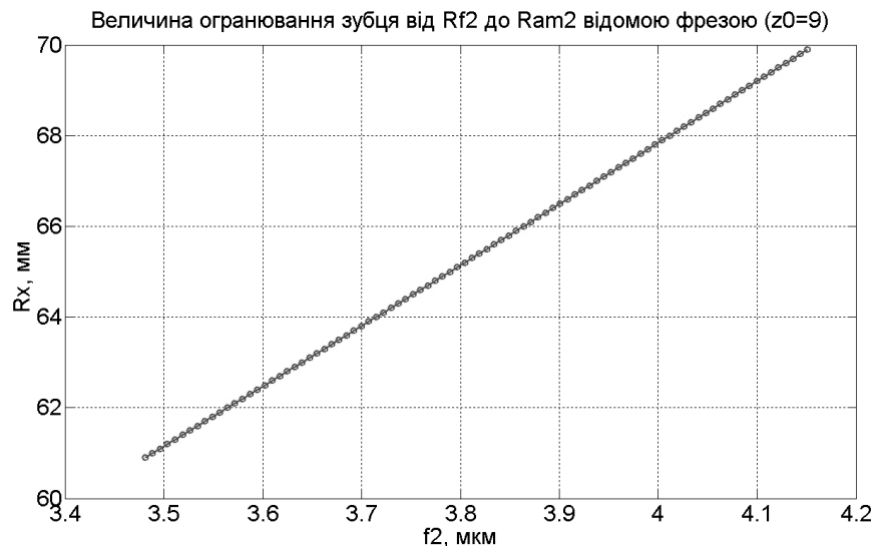


Рис. 2. Величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса від R_{f2} до R_{am2} відомою черв'ячною фрезою з $z_0 = 9$

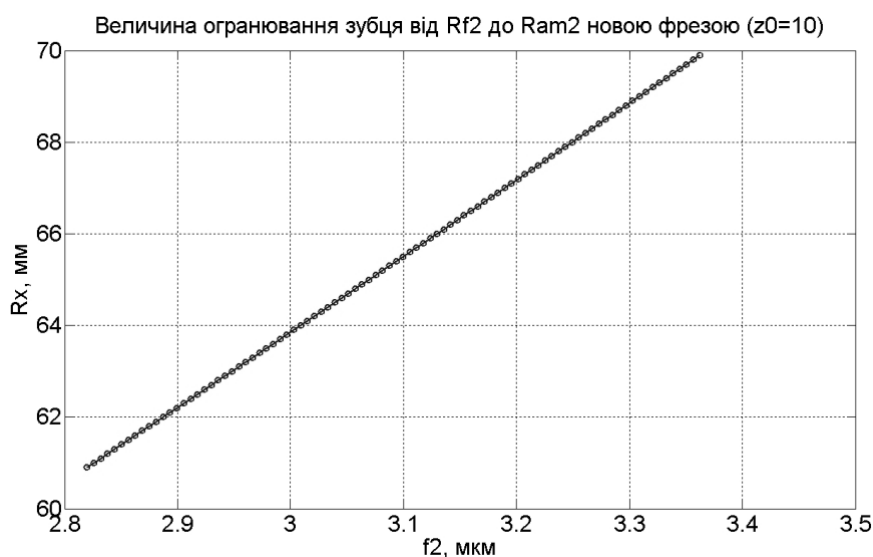
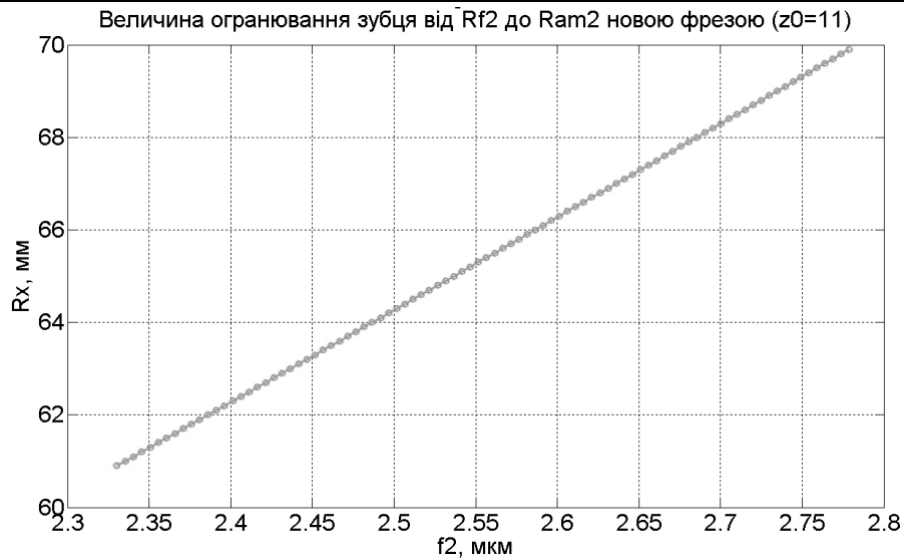
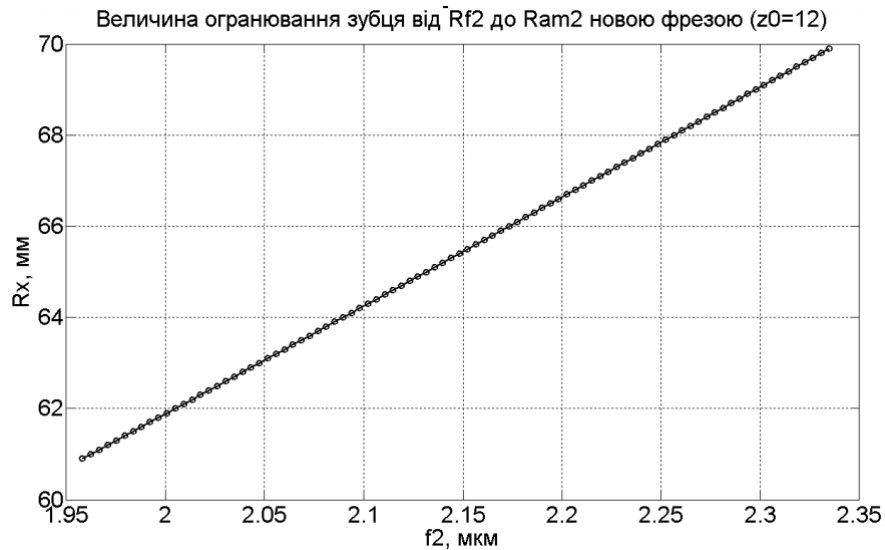
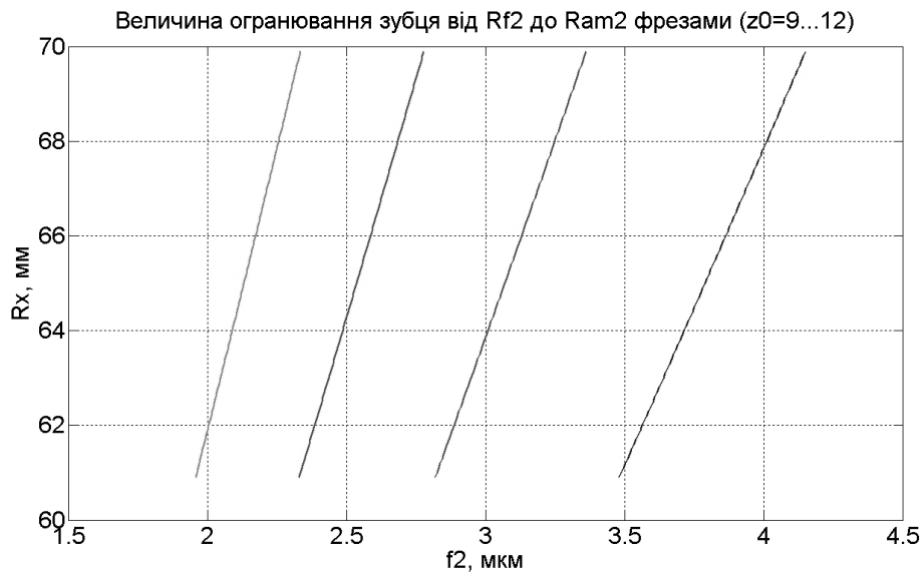


Рис. 3. Величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса від R_{f2} до R_{am2} новою черв'ячною фрезою з $z_0 = 10$

Рис. 4. Величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса від R_{f2} до R_{am2} новою черв'ячною фрезою з $z_0 = 11$ Рис. 5. Величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса від R_{f2} до R_{am2} новою черв'ячною фрезою з $z_0 = 12$ Рис. 6. Величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса від R_{f2} до R_{am2} черв'ячними фрезами з $z_0 = 9 \dots 12$.

Аналіз рис.2 показує, що величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса варіантом обробки відомою чистовою черв'ячною фрезою з $z_0 = 9$ зростає від R_{f2} до R_{am2} та знаходиться у діапазоні 3,4...4,2 мкм.

Аналіз рис.3 показує, що величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса новою чистовою черв'ячною фрезою з $z_0 = 10$ зростає від R_{f2} до R_{aM2} та знаходиться у діапазоні 2,8...3,4 мкм.

Аналіз рис.4 показує, що величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса за варіантом обробки новою чистовою черв'ячною фрезою з $z_0 = 11$ зростає від R_{f2} до R_{aM2} та знаходиться у діапазоні 2,3...2,8 мкм.

Аналіз рис.5 показує, що величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса за варіантом обробки новою чистовою черв'ячною фрезою з $z_0 = 12$ зростає від R_{f2} до R_{aM2} та знаходиться у діапазоні 1,95...2,35 мкм.

Аналіз рис.6 показує, що величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса за варіантом обробки чистовими черв'ячними фрезами з $z_0 = 9...12$ зростає від R_{f2} до R_{aM2} .

Таким чином, для проведених досліджень величина Δf_2 огранювання зубця черв'ячного колеса за варіантом обробки чистовими черв'ячними фрезами з $z_0 = 9...12$ зростає від R_{f2} до R_{aM2} .

На рис.7 зображено результати розрахунків розробленої в середовищі MATLAB щодо визначення мінімальної кількості зубців черв'ячної фрези, яка забезпечує точність черв'ячного колеса за ГОСТ 3675 за показником f_{f2} .

Аналіз рис.7 показує, що мінімальна кількість зубців черв'ячної фрези для забезпечення точності черв'ячного колеса за ГОСТ 3675 за показником f_{f2} становить:

- для 1 класу точності – 14;
- для 2 класу точності – 12;
- для 3 класу точності – 11;
- для 4 класу точності – 9;
- для 5 класу точності – 8;
- для 6 класу точності – 7;
- для 7 класу точності – 6;
- для 8 класу точності – 5.

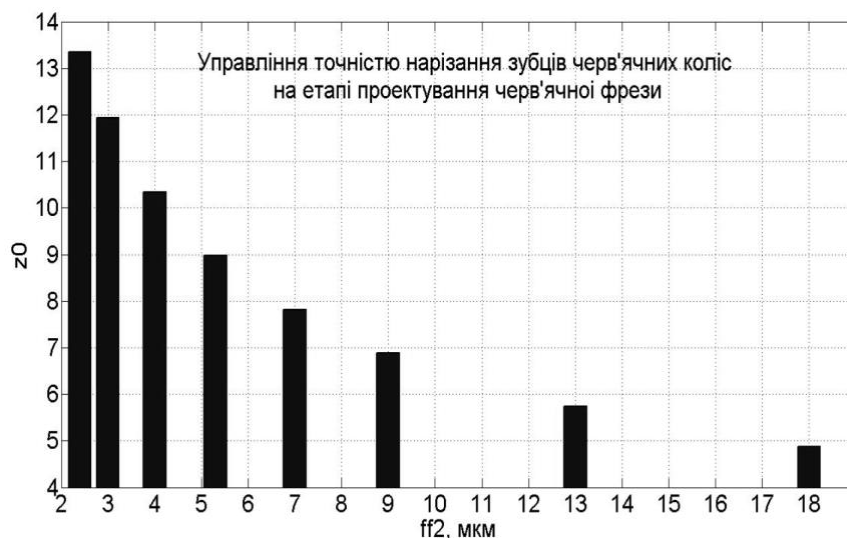


Рис. 7. Результати розрахунків щодо визначення мінімальної кількості зубців черв'ячної фрези, яка забезпечує точність черв'ячного колеса за ГОСТ 3675 за показником f_{f2} .

Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень:

- запропоновано нове рівняння перекриття між зубцями першого та другого проходів, яке враховує радіус заокруглення вершин зубців черв'ячних фрез;
- розроблено нове поділення профілю інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез;
- аналітично визначено величину огранювання зубців черв'ячних коліс, що оброблюватимуться новими збірними черв'ячними фрезами;
- аналітично визначено мінімальну кількість інструментальних рейок збірних черв'ячних фрез, що на етапі проектування різального інструменту дає можливість управляти точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини по висоті профілем інструментальної рейки;
- встановлено, що величина огранювання зубців черв'ячних коліс зростає від радіусу западин до максимального радіусу вершин черв'ячного колеса;
- встановлено, що величина огранювання зубців черв'ячних коліс в двічі зменшується при зростанні кількості рейок черв'ячної фрези від 9 до 12;

– підтверджено можливість управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини по висоті профілем інструментальної рейки на етапі проектування різального інструменту

Література

1. Охріменко О. А. Загальні основи теорії проектування черв'ячних фрез : дис. ... д-ра техн. наук. : 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Олександр Анатолійович Охріменко. - Київ, 2015. - 323 с.
2. Равська Н. С., Охріменко О. А., Сташкевич С. І. Підвищення точності профілювання черв'ячних фрез. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки", 2007, 2 (41): 36-39.
3. Литвиняк Я. М. Технологічне забезпечення нарізання зубчастих коліс середніх і великих модулів черв'ячними фрезами, оснащених вставними твердосплавними зубцями із зменшеним кутом профілю / Я. М. Литвиняк, І. І. Юрчишин, Є. В. Гвоздик // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2019. - № 913. - С. 31-38.
4. Грицай, І. Є.; Вільшанецький, В. І. Удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс на основі нового методу зубонарізання. Вісник НТУ "ХПІ": збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». - Харків, 2011, 44-52.
5. Грицай, І. Є. Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс. Львів: СПОЛОМ 2009р.-254с, 2009.
6. Ковришкін, М. О.; Рудич, М. Л. Вплив кута сточування на геометрію збірних незатілених черв'ячних фрез з поділенням профілем. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2010, 23: 146-153.
7. Ковришкін М.О., Сабірязнов Т. Г., Садченко О. І. Визначення органічної похибки профілювання черв'ячних фрез з поділенням профілем інструментальної рейки. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград, 2008. - Вип. № 21 - С. 247-252.
8. Ковришкін М.О., Ж.А.Хамуйела Герра, Помазан Т.І. Інструментальне забезпечення обробки черв'ячних коліс черв'ячних передач з угнутим профілем витка черв'яка/ Міжнародна науковопрактична конференція «Актуальні питання науки та практики: досягнення та перспективи – 2007» 3-7 грудня м.Полтава. – Полтава: АНП, 2007. – С.85-88

References

1. Okhrimenko O. A. Zagalni fundamentals of the theory of design of hob cutters: dis. ... Dr. Tech. Sci. : 03/05/01 - processes of mechanical processing, layout and tools / Oleksandr Anatoliyovich Okhrimenko. - Kiev, 2015. - 323 p.
2. Ravska N. S., Okhrimenko O. A., Stashkevich S. I. Improved accuracy of profiling of hob cutters. Newsletter of the Railway University. Series "Technical Sciences", 2007, 2 (41): 36-39.
3. Litvinyak Ya. M. Technological safety of cutting gears of medium and large modules with hob cutters equipped with insert carbide teeth with a changed profile / Ya. M. Litvinyak, I. I. Yurchyshyn, E. V. Gvozdyk // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Optimization of manufacturing processes and technical control of machinery and equipment. - 2019. - No. 913. - P. 31-38.
4. Gritsai, I. E.; Vilshanetsky, V. I. Improved technology for the production of gear wheels based on a new gear cutting method. Bulletin of NTU "KhPI": collection of scientific works "Problems of mechanical drive". - Kharkiv, 2011, 44-52.
5. Gritsai, I. E. Theoretical and applied foundations of complex scientific research into the cutting process of gear wheels. Lviv: SPOLOM 2009r.-254s, 2009.
6. Kovrishkin, M. O.; Rudich, M. L. Injection of cut into the geometry of prefabricated non-backed hob cutters with a subdivided profile. Collection of scientific works of the Kirovograd National Technical University. Technology in the agricultural sector, Galuzev mechanical engineering, automation, 2010, 23: 146-153.
7. Kovrishkin M.O., Sabirzyanov T.G., Sadchenko O.I. The importance of organic degradation of the profiling of hob cutters with the division of the tool rack profile. // Collection of scientific works of the Kirovograd National Technical University / technology in the agricultural industry, Galuzev machine building, automation. - Kirovograd, 2008. - VIP. No. 21 - pp. 247-252.
8. M.O. Kovryshkin, Z.A. Khamuyela Guerra, T.I. Pomazan. Instrumental support for processing worm wheels of worm gears with a concave profile of a worm whorl / International Scientific and Practical Conference "Actual Issues of Science and Practice: Achievements and Prospects - 2007" December 3-7, Poltava. – Poltava: ANP, 2007. – P.85-88.