ISSN 2076-1546

УДК 515.2:536.3:664.8 DOI: 10.46972/2076-1546.2025.28.02

Т. М. Могилянець, Г. В. Трушков

РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФІЛЮ БАГАТОЗАХІДНОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ЗУБЧАСТИХ ЗАЧЕПЛЕНЬ В ОЗБРОЄННІ ТА ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНІЦІ

Із появою новітніх технологій виготовлення військової техніки та озброєння, а також розвитком сучасної обчислювальної техніки перед конструкторами постає необхідність розроблення нових, більш ефективних способів моделювання спряжених криволінійних поверхонь кінематичних пар зубчастого зачеплення без інтерференції. У статті розглянуто питання створення способу моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення гвинтових зубчастих зачеплень в озброєнні та військовій техніці. Цей спосіб моделювання спрямований на вдосконалення оброблення зубчастих спряжених криволінійних зачеплень, які використовуються в підйомних механізмах гармат, поворотних механізмах башт танків і самохідних артилерійських установок.

Надійність і довговічність сучасних машинобудівних виробів, які містять велику кількість елементів зі складними спряженими криволінійними поверхнями зубчастого зачеплення, значною мірою визначаються точністю їх виготовлення. У практиці моделювання кінематичних пар спряжених криволінійних поверхонь часто виникають певні труднощі, тісно пов'язані зі створенням зубчастих виробів військової техніки та озброєння. Саме тому актуальним є розроблення ефективного способу моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення спряжених криволінійних зубчастих поверхонь, що дозволяють уникнути інтерференції ще на стадії проєктування виробу, вузлів і агрегатів озброєння та військової техніки. Запропонований спосіб сприятиме вдосконаленню процесу моделювання, а також підвищенню точності оброблення зубчастих коліс та загальної продуктивності виробничих процесів пропонованою фрезою.

Ключові слова: *зубчасте зачеплення; технічне рішення; технологічний процес моделювання профілю; спряжена поверхня; параметризація; процес розроблення; архімедова спіраль; кінематична пара; інтерференція; озброєння та військова техніка.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сьогодні потребує ретельного дослідження технологічний процес розроблення нових способів моделювання профілю ріжучого інструмента гвинтової криволінійної поверхні, а саме багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення зубчастих спряжених зачеплень кінематичних пар підйомного механізму гармат, поворотних механізмів башти танка та самохідних артилерійських установок.

Однією з найважливіших проблем під час оброблення криволінійної поверхні профілю ріжучого інструмента багатозахідної черв'ячної фрези є виключення інтерференції. Якщо вона досить велика, то оброблення ріжучого інструмента спричиняє підрізання кромки фрези (зниження точності, неможливість подальшого оброблення).

© Т. М. Могилянець, Г. В. Трушков, 2025

Унаслідок цих деформацій у разі великої інтерференції зубів відбувається проскок. Таке оброблення криволінійної поверхні профілю ріжучого інструмента багатозахідної черв'ячної фрези неприпустима, оскільки вона призводить до збільшення динамічних навантажень та зношування, які засмічують мастило, що може зумовити псування обробного механізму з виготовлення ріжучого інструмента.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення дослідження закладені в роботі [1]. Явище інтерференції описано так: “Інтерференція настає тоді, коли якась частина простору виявляється всередині об’ємів двох тіл одночасно”. Якщо одне з тіл є різальним інструментом, а інше – деталь, то інтерференція спричиняє підрізання та зниження точності під час оброблення виробу. Якщо це тіла, то виготовлення ріжучого інструмента призводить до зрізу зубів. У [2] запропоновано інше визначення: “Інтерференцією називається будь-який неправильний дотик профілів поза активними ділянками лінії зачеплення, тобто явище, коли траєкторія кромки одного зуба у відносному русі перетинає профіль спряженого зуба”. Проте щодо інтерференції передбачалася побудова великої кількості аксоїдів, що робить відповідні дослідження недоцільними в практичному використанні.

В основі утворення спряжених гвинтових криволінійних поверхонь лежить теорема професора Подкоритова А. М. [3, 4], із якої випливає, що поверхні $\sum_A$ і $\sum_B$ спряжені, якщо кожна з них утворена відповідним відносним рухом $\Phi_A / \sum_A$ і $\Phi_B / \sum_B$ конгруентних посередників $\Phi_A = \Phi_B$. Поверхня $\sum_A$ і поверхня посередника Φ_A є взаємообвідними з лінійним контактом $l^1 \left(l^1_2 \right)$ [5].

Формулювання завдання дослідження. Метою цього дослідження є розроблення способу моделювання профілю ріжучого інструмента багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення гвинтових зубчастих зачеплень, спряжених із гвинтовою поверхнею, що обробляється, у спряжених кінематичних парах механізмів, застосовуваних в озброєнні та військовій техніці. Для її досягнення розглянемо архімедову й логарифмічну спіралі та пряму лінію.

Виклад основного матеріалу. Основою для виконання завдання є насамперед створення рішення для виготовлення оброблювальних інструментів, на що і спрямовані пропоновані дослідження. На практиці в моделюванні виробів із криволінійним спряженням поверхонь часто виникають проблеми [5], тісно пов'язані з авіаційною, військовою технікою, машинобудуванням, верстатобудівною та інструментальною галузями. Із появою новітніх технологій виготовлення військової техніки та озброєння, які ґрунтуються на обробленні виробів в автоматизованих виробничих комплексах, з урахуванням особливостей сучасної обчислювальної техніки перед конструкторами постає необхідність розроблення нових, більш складних методів моделювання спряжених поверхонь без інтерференції [6]. Це дозволить не лише скоротити час на проєктування, підвищити надійність, довговічність і точність розрахунково-графічних процесів, але й надасть можливості для технічного моделювання досліджуваних виробів із

застосуванням інноваційних технологічних підходів через комп’ютерні технології. Такий розвиток сприяє значному підвищенню обчислювальних і графічних можливостей сучасної комп’ютерної техніки, а також засобів проєктування та аналітичного аналізу [7]. У результаті відкриваються нові перспективи для моделювання профілів ріжучих інструментів у ході створення кінематичних пар для озброєння та військової техніки, що дозволяє усунути інтерференцію ще на етапі проєктування.

Після вивчення різних об'єктивних методів моделювання профілю ріжучих інструментів, а саме багатозахідних черв'ячних фрез, було виявлено, що чинні методи не є достатньо практичними у виробництві, тому для виготовлення багатозахідної черв’ячної фрези із необхідною точністю задаються параметри контактної поверхні зачеплення з наперед визначеними умовами [8, 9], що дозволяє виключити інтерференцію під час оброблення деталей. У кожній формі виробничого технологічного процесу інструмент визначає не лише технічну послідовність дій, а й форму оброблюваної деталі. Покращення інженерних процесів неможливе без належної уваги до якості інструментів. Так, наприклад, застосування багатозахідних ріжучих інструментів, зокрема черв'ячних фрез, не лише оптимізує технологічні операції, але й забезпечує вищу точність і продуктивність у виготовленні деталей.

У практиці розрахунку ріжучих інструментів найбільш загальним і вживаним є випадок обертання тіл навколо осей, що схрещуються. Відносний рух об'єктів, як відомо, є гвинтовим [1] і характеризується осями та параметрами гвинтової лінії.

Однією з ключових проблем ході профілювання ріжучих інструментів є точне визначення форми вихідної гвинтової робочої поверхні багатозахідної черв'ячної фрези, яка має відповідати оброблюваній гвинтовій поверхні [3]. Черв'ячні фрези належать до найбільш поширених інструментів у сфері металообробки. Жоден інший інструмент не демонструє такого різноманіття типів, форм і сфер використання, як фрези. Їх суттєвою перевагою є можливість ефективного профілювання деталей.

За основу розроблення моделювання профілю багатозахідної черв’ячної фрези на базі теорії архімедової спіралі взято логарифмічну спіраль і пряму лінію. Однак варто зауважити, що на практиці перевагу надають саме архімедовій спіралі. Кожна крива профілю повинна забезпечувати достатні задні кути до всіх точок ріжучої кромки профілю і при цьому залишатися досить великою, щоб задовольнити технічний процес різання, навіть у разі багаторазового шліфування. У цьому сенсі спіраль Архімеда показує досить задовільні результати (рис. 1).

Рівняння архімедової спіралі в полярній системі координат має такий вигляд (рис. 1):

$$\varsigma = b\Theta,$$

де ς та Θ – радіус-вектор і полярний кут в радіанах даної точки спіралі;

b – коефіцієнт (пропорційності), що характеризує розміри спіралі.

Із формули видно, що приріст кута повороту прямо пропорційний приросту радіуса-вектора. Підйом спіралі (збільшення радіуса-вектора за один оберт) – це величина постійна.

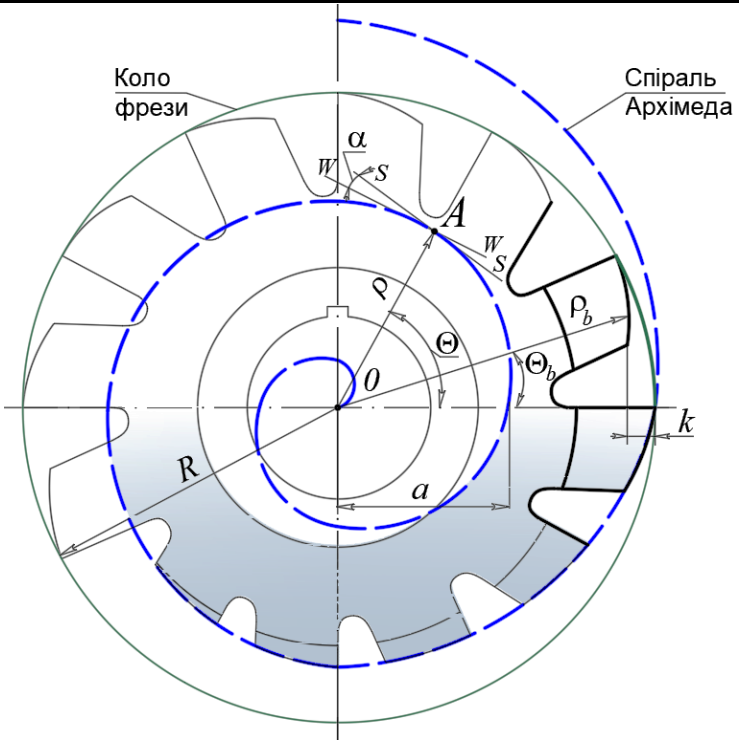

Рис. 1. Архімедова спіраль як крива для затилуваного зуба

Для кута $\Theta = \frac{\alpha}{2\pi}$ радіус-вектор $\varsigma = \alpha,$ тоді $b = \alpha / 2\pi$.

Відповідно, рівняння спіралі можна записати в такий спосіб:

$$\varsigma = \frac{\alpha}{2\pi}\Theta.$$

Щодо зуба фрези, то рівняння архімедової спіралі за вершиною можна записати як

$$\varsigma_b = R - \frac{\alpha}{2\pi}\Theta_b,$$

де R – зовнішній діаметр фрези.

Задній кут лежить між дотичною до спіралі S – S_s і дотичною до кола W – W_s, проведеними в точці A (рис. 2).

Користуючись формулою з диференціальної геометрії, можемо зазначити таке:

$$tg\alpha = \frac{d\varsigma}{\varsigma d\Theta}; \frac{d\varsigma}{d\Theta} = \frac{\alpha}{2\pi}; tg\alpha = \frac{\alpha}{2\pi\varsigma} = \frac{1}{\Theta},$$

а також

$$ctg\alpha = \Theta.$$

Величина підйому спіралі становить

$$a = kz,$$

де k – величина підйому спіралі, відповідна кроку зубів, або величина затилування;

z – кількість зубів фрези.

Отже,

$$tg\alpha = \frac{kz}{2\pi\varsigma}.$$

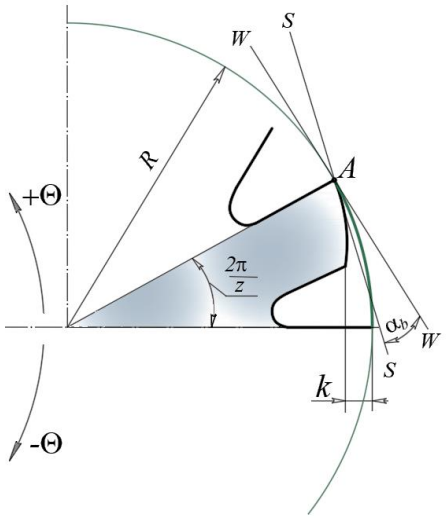

Рис. 2. Визначення заднього кута

Вважаючи, що $\varsigma = R,$ знаходимо залежність між заднім кутом на вершині зуба α_B, радіусом, кількістю зубів і величиною затилування фрези:

$$tg\alpha_B = \frac{kz}{2\pi R},$$

звідси визначимо величину затилування:

$$k = \frac{\pi D}{z} tg\alpha_B,$$

де D – діаметр фрези.

Для повідомлення затилувальних рухів у супорті верстата встановлено кулачок, величина спадання якого дорівнює величині затилування, що відноситься до повного оберту кулачка, а на фрезі – до центрального кута 360°/z. На кожному кулачку позначається величина спадання.

Як відомо, задній кут у вимірюваній площині зазвичай знаходиться між площиною, дотичною до площини основи зуба, і площиною, дотичною до тієї, що утворена обертанням ріжучої кромки (наприклад, вершини зуба). Обидві площини є дотичними, проведеними до однієї точки, і вимірювана площина через цю дотичну може бути проведена нескінченно.

Проте нас цікавлять лише три площини вимірювання (рис. 3):

а) *PP* – площина, перпендикулярна до осі отвору фрези;

б) *NN* – площина, перпендикулярна до проєкції бічної ріжучої кромки на площину, перпендикулярну до передньої поверхні;

в) *OO* – площина, паралельна до осі отвору.

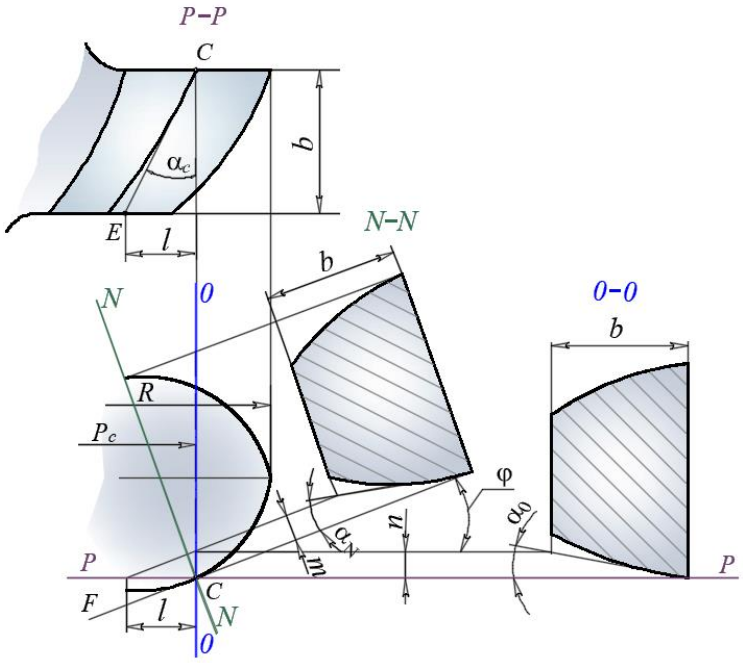

Рис. 3. Визначення задніх кутів у різних площинах для довільної точки зуба фрези

До затилуваної поверхні дотична площина може бути визначена двома дотичними до однієї і тієї ж точки з прямими, розташованими в цій площині. Одна з них – пряма *CE*, дотична до архімедової спіралі, інша – *CF*, дотична до кривої профілю зуба.

Дотична площина до поверхні циліндра може бути задана також двома дотичними до тієї ж точки *C* прямими, розташованими в цій площині. Одна з них – пряма *CH*, перпендикулярна до радіуса-вектора (наприклад, ςC для точки *C*), інша – *CF*, дотична до кривої профілю зуба.

Позначимо задні кути: α_C – у вимірюваній площині *PP*, α_0 – у площині *OO*, α_N – у площині *NN*, крім того, α_B – кут на вершині.

Кут α_C визначаємо таким чином (рис. 3):

$$tg\alpha_C = \frac{R}{\varsigma_C} tg\alpha_B.$$

Кут α_0 знаходимо в такий спосіб: (рис. 3):

$$tg\alpha_0 = \frac{n}{b}; n = ltg\varphi; b = \frac{l}{tg\alpha_C}.$$

Після підстановки маємо

$$tg\alpha_0 = tg\alpha_C tg\varphi = \frac{R}{\varsigma_C} tg\alpha_B tg\varphi,$$

де φ – кут між дотичною до профілю та віссю профілю (тобто прямої, перпендикулярної до осі фрези).

Кут α_N визначаємо як

$$tg\alpha_N = \frac{m}{b}; b = \frac{l}{tg\alpha_C}; m = l\sin\varphi.$$

Після підстановки отримуємо

$$tg\alpha_N = tg\alpha_C \sin\varphi = \frac{R}{\varsigma_C} tg\alpha_B \sin\varphi.$$

Останнє рівняння показує, що кут α_N є мінімальним за своєю величиною порівняно із заднім кутом в інших перетинах. Щоправда, різниця між α_0 і α_N практично мала і для максимального значення $\alpha_B = 15°$ маємо $\alpha_N = 0,97\alpha_0$. Проте для розрахунку кута α_B користуємося величиною α_N.

Зі зменшенням кута φ кут α_N стає меншим і на ділянках ріжучих кромок із $\varphi = 0$ задній кут α_N дорівнює нулю. Під час розрахунку зазвичай задається мінімально допустимим заднім кутом α_N на бічних кромках у межах 2°–3° і лише у виняткових випадках його можна знизити до 1°–1,5°.

Потім аналітичним шляхом або графічно визначаємо кут φ для найсприятливішої точки бічної кромки, тобто мінімальне його значення. Якщо воно виявляється менше 5°, що зрізає частку евольвенти, то для фрез із напівкруглими опуклими й увігнутими профілями передбачені скоси під кутом 10°.

Знаючи φ і α_N, знаходимо задній кут α_B на вершині зуба фрези згідно з такою формулою:

$$tg\alpha_B = \frac{\varsigma_C tg\alpha_N}{R\sin\varphi}.$$

Після цього знаходимо величину затилування та підбираємо з можливих розмірів кулачків найбільш відповідний для визначеного округлення величини його спадання.

Для контролю моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези, у разі профілювання шаблону, необхідно визначати перетин поверхні, що лежить в площині, перпендикулярній до гвинтової паралелі, на початковому циліндрі з діаметром.

Профіль шаблону можна визначити графічно та аналітично.

На сьогодні багатозахідні черв'ячні фрези є найбільш продуктивними, їх широко застосовують у військовій техніці та озброєнні для оброблення багатьох деталей у масовому й серійному виробництві.

Висновки. Запропонований спосіб моделювання ґрунтується на теорії спряжених поверхонь, які дають змогу визначити конфігурацію ріжучих кромок зубонарізних інструментів, що гарантують відсутність інтерференції. Щодо зубчастих коліс, то це означає відсутність підрізання з потрібним діапазоном кількості зубців коліс передачі із застосуванням нестандартних значень модуля, які визначаються. Розроблення моделювання профілю ріжучого інструмента описаним вище способом надасть можливість визначати криволінійну похибку ріжучого інструмента, що дозволить враховувати явище інтерференції, оброблювати нові зубчасті криволінійні спряжені поверхні зачеплення на виробництві, а також здійснювати ремонт військової техніки в польових умовах, що сприятиме пришвидшенню процесу введення в стрій зразка озброєння.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Podkorytov A. Theoretical Bases of Conjugate Quazihelical Surfaces, Excluding Interference // 10th Intern. Conf. on Engineering Design Graphios and Descriptive Geometry. Texas, USA, Austin. 2002. Vol. 1. P. 43–47.

2. Подкоритов А. М., Ісмаілова Н. П. Загальний ітераційній метод виключення інтерференції спряжених квазігвинтових поверхонь // Сучасні проблеми моделювання. Мелітополь : Мелітопольський держ. пед. ун-т, 2016. Вип. 5. С. 98–103. URL: http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1488 (дата звернення: 01.10.2024).

3. Подкорытов А. Н. Исключение интерференции сопряженных поверхностей зубчатых передач // International Congres – Gear Transmissional. Sofia, Bulgaria, 1995. С. 143–145.

4. АС 1272041. Зубчатая передача с перекрещивающими осями : авторское свидетельство / А. Н. Подкорытов, А. Ф. Жадан. Опубл. 1986, Бюл. № 10. 3 с.

5. Подкоритов А. М. Ітераційний метод та алгоритм виключення інтерференції складних спряжених поверхонь за наперед заданими умовами // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Міжвідомча наук.-техніч. збірка. Київ : КНУБА, 2000. Вип. 64. С. 109–113.

6. Ismailova N., Bogach V., Lebedev B. Development of a Technique for the Geometrical Modeling of Conjugated Surfaces when Determining the Geometrical Parameters of an Engagement Surface Contact in Kinematic Pairs // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkiv : Technology Center, 2020. № 1/4 (106). P. 17–22. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209108

7. Development of the Method for the Formation of One-Dimensional Contours by the Assigned Interpolation Accuracy / Y. Havrylenko, Y. Kholodniak, O. Vershkov, A. Naidysh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Iss. 4 (91). P. 76–82. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123921

8. Ismailova N. P., Mohylyanets T. M., Oliynyk N. V. Graphoanalytical Profiling of Conjugate Curvilinear Surfaces of a Cutting Tool // Collection of Scientific Works of the Military Academy (Odesa). 2023. № 1 (19). P. 23–28. https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.23-28

9. Ісмаілова Н. П., Мікрюков І. С., Бикова Л. Г. Технічне рішення для проєктування спряжених зубчастих зачеплень щодо визначення інтерференції в озброєнні та військовій техніці // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (І). С. 82–92. https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.07

Стаття надійшла до редакції 27.02.2025.

REFERENCES

1. Podkorytov, A. (2002). Theoretical Bases of Conjugate Quazihelical Surfaces, Excluding Interference. In *10th Intern. Conf. on Engineering Design Graphios and Descriptive Geometry, Vol. 1*. (pp. 43–47). Texas, USA, Austin.
2. Podkorytov, A. M., & Ismailova, N. P. (2016). Zahalnyi iteratsiinii metod vykliuchennia interferentsii spriazhenykh kvazihvyntovykh poverkhon [General Iterative Method for Eliminating Interference of Conjugate Quasi-Helical Surfaces]. *Suchasni problemy modeliuvannia [Modern Problems of Modeling], 5,* 98–103. Melitopol. Retrieved from http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1488 [in Ukrainian].
3. Podkorytov, A. M. (1995). Isklyuchenie interferencii sopryazhennyh poverhnostej zubchatyh peredach [Elimination of interference of mating surfaces of gear transmissions]. In *International Congres – Gear Transmissional.* Sofia–BULGARIA. (pp. 143–145).
4. Podkorytov, A. N., Zhadan, A. F. (1986). *Zubchataya peredacha s perekreshivayushimi osyami : avtorskoe svidetelstvo [Toothed gear with intersecting axes: Author's certificate AC 1272041]* [in Russian].
5. Podkorytov, A. M. (2000). Iteratsiinyi metod ta alhorytm vykliuchennia interferentsii skladnykh spriazhenykh poverkhon za napered zadanymy umovamy [Iterative Method and Algorithm for Eliminating Interference of Complex Conjugate Surfaces under Predetermined Conditions]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika. Mizhvidomcha nauk.-tekhnich. zbirka [Applied Geometry and Engineering Graphics. Interdepartmental Scientific and Technical Collection], 64,* 109–113. Kyiv [in Ukrainian].
6. Ismailova, N., Bogach, V., & Lebedev, B. (2020). Development of a Technique for the Geometrical Modeling of Conjugated Surfaces when Determining the Geometrical Parameters of an Engagement Surface Contact in Kinematic Pairs. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/4* (106), 17–22. Kharkiv. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209108
7. Havrylenko, Y., Kholodniak, Y., Vershkov, O., & Naidysh, A. (2018). Development of the Method for the Formation of One-Dimensional Contours by the Assigned Interpolation Accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1,* Iss. 4 (91), 76–82. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123921
8. Ismailova, N. P., Mohylyanets, T. M., & Oliynyk, N. V. (2023). Graphoanalytical Profiling of Conjugate Curvilinear Surfaces of a Cutting Tool. *Collection of Scientific Works of the Military Academy (Odesa), 1* (19), 23–28. https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.23-28
9. Ismailova, N. P., Mikryukov, I. S., & Bykova, L. G. (2024). Tekhnichne rishennia dlia proiektuvannia spriazhenykh zubchastykh zacheplen shchodo vyznachennia interferentsii

v ozbroienni ta viiskovii tekhnitsi [A Technical Solution in Designing Coupled Gear Engagements Regarding the Determination of Interference in Weapons and Military Techniques]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system : zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute], 27* (1), 82–92. https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.07 Zhytomyr [in Ukrainian].

T. M. Mohylyanets′, H. V. Trushkov

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MODELING THE PROFILE OF A MULTI-SLOT WORM CUTTER FOR MACHINING HELICAL GEAR GEARS IN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

With the advent of the latest technologies for manufacturing military equipment and weapons, along with the progress of modern computing technology, designers are faced with the need to develop new, more effective methods for modeling conjugate curved surfaces of kinematic pairs of gearing without interference. The article considers the issues of creating a method for modeling the profile of a multi-cut worm cutter for machining helical gears in weapons and military equipment. This modeling method is aimed at improving the processing of toothed conjugate curvilinear gears used in gun lifting mechanisms, tank turret turning mechanisms, and self-propelled artillery installations.

The reliability and durability of modern mechanical engineering products, which include a large number of elements with complex conjugate curved surfaces of gearing, are largely determined by the accuracy of their manufacture. In the practice of modeling kinematic pairs of conjugate curved surfaces, certain difficulties often arise that are closely related to the creation of gear products for military equipment and weapons. That is why it is relevant to develop an effective method for modeling the profile of a multi-prong worm cutter for machining conjugate curved tooth surfaces, which allows avoiding interference even at the design stage of the product of components and assemblies of weapons and military equipment. The proposed method will help improve the modeling process, as well as increase the accuracy of gear machining and the overall productivity of production processes with the proposed milling cutter.

Keywords: *gearing; technical solutions; technological process of profile modeling; conjugate surfaces; parameterization; development process; Archimedes spirals; kinematic pairs; interference; weapons and military equipment.*