

Булік Ю.В., Павлюк В.І., Куць Н.Г., Онищук В.П.
Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС КОНІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ З КРУГОВОЮ ФОРМОЮ ЗУБІВ У ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСАХ ТРИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Представлено методику проектування конічних зубчастих коліс із круговими профілями зубів у системах 3D CAD. Через відсутність вбудованих інструментів для створення таких типів механізмів на платформах Creo, NX і Catia, запропоновано спеціальний підхід до параметричного моделювання. Метод заснований на побудові сферичної евольвентної поверхні, що спрощує математичний опис геометрії зубчастого колеса та забезпечує високу точність моделювання. Використання параметричних рівнянь забезпечує повну асоціативність у середовищі САПР, сприяючи швидким змінам конструкції та інтеграції в більш широкі інженерні системи. Особливу увагу приділено покроковій процедурі конструювання такого типу шестерні в програмному середовищі Creo. Це забезпечує практичну застосовність і відтворюваність методу для інженерних цілей. Розроблений підхід також добре узгоджується з процесами адитивного виробництва, дозволяючи безпосередньо використовувати згенеровані моделі для 3D-друку без подальших модифікацій. Це значно прискорює процес створення прототипу та виробництва. Ефективність запропонованої методики перевірена побудовою зубчастих коліс в Creo. Крім цього, дана методика може бути адаптована для інших типів зубчастих передач, у тому числі із гвинтовими, спіральними та евольвентними зубами. Вказано на необхідність автоматизації запропонованого процесу побудови за допомогою інструментів UDF, що доступні у CAD-програмах тримірного моделювання, або API функцій.

Ключові слова: проектування, зубчасте зачеплення, круговий зуб, сферична евольвента, параметризація, зборка.

ВСТУП

Проектування зубчастих зачеплень у системах тримірного моделювання пов'язане з низкою технічних труднощів. Особливо складною є побудова конічних передач із круговим профілем зуба, яка потребує високої геометричної точності, складного математичного опису та значних витрат часу при реалізації в САД-середовищі.

У зв'язку з цим розробка методики побудови параметричних моделей зубчастих передач із круговим профілем зуба є актуальним та практично значущим завданням. Така методика дозволить забезпечити повноцінну інтеграцію створених моделей у загальну конструкторську систему, зберігати асоціативні зв'язки між елементами конструкції та істотно підвищити якість і швидкість проектування, що є особливо важливим при «низхідному» методі моделюванні [1]. Також запропонований підхід має особливу практичну цінність у контексті розвитку технологій адитивного виробництва, зокрема 3D друку. Завдяки високій точності тривимірного моделювання, створені параметричні моделі можуть бути безпосередньо використані для виготовлення деталей на 3D-принтерах без необхідності подальшої доопрацювання. Це значно скорочує час підготовки виробництва, спрощує процес створення прототипів і дозволяє оперативного отримувати кінцеві вироби з урахуванням індивідуальних конструктивних вимог.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для полегшення процесу побудови зубчастих передач у деяких САД-системах передбачено автоматизовані модулі побудови зубчастих коліс. Зокрема, у SolidWorks, Autodesk Inventor та Solid Edge використовується модуль GearTrax [2], який дозволяє швидко створювати і редагувати параметричні моделі передач. Однак для таких модулів не передбачена інтеграція з Creo, NX, Catia і тому доводиться застосовувати імпортовані моделі у форматах step, iges. При цьому імпорт моделей із зовнішніх джерел призводить до втрати параметризації та обмежує можливості редагування. Тому розробка алгоритму побудови зубчастих передач у програмному середовищі таких САД-систем є важливою та актуальною задачею.

Існують різноманітні методики розрахунку та проектування зубчастих коліс [3...6]. Проте використання даних методик потребує приведення математичного апарату до такої форми, яка робить можливим їх застосування з інструментами побудови поверхонь і кривих, доступних у вищезгаданих САД-програмах [7].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження та вибір методики розрахунку зубчастих передач, математичний апарат якого може бути застосований з інструментами побудови конструктивних елементів (поверхонь, кривих тощо) CAD програм.

Розробка методики побудови конічного зубчастого зачеплення із круговими зубами в програмних комплексах Creo, NX та Catia.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На практиці використовують конічні передачі як із сферичною евольвентою, так і октаїдальні [4, 5]. Для спрощення задачі розроблено методику побудови конічної передачі із сферичною евольвентною поверхнею зубів. Цей вибір пояснюється більш простою математичною моделлю, що описує геометрію евольвентного зубчастого зачеплення.

Загалом спосіб побудови зубчастого зачеплення із прямим зубом було відображено в роботах [8, 9]. Однак побудова конічного зубчастого колеса із круговим зубом є дещо складнішою задачею, оскільки лінія зуба (лінія перетину співвісної площини колеса з поверхнею зуба) в даному випадку не є прямою.

Для виведення формули сферичної евольвенти підготовлено розрахункові схеми представлені на рисунках 1 та 2. На рисунку 1 поверхні K_1 і K_2 – це відповідно ділильний та основний конуси конічного колеса. Якщо колеса виконані без зміщення, то ділильний конус є також і початковим конусом. Площина Π будується наступним чином: спочатку будується площина дотична до ділильного конуса вздовж прямої OA , потім побудована площина повертається навколо осі OA на кут α . Площина Π дотикається до основного конуса вздовж прямої OK [2, 3].

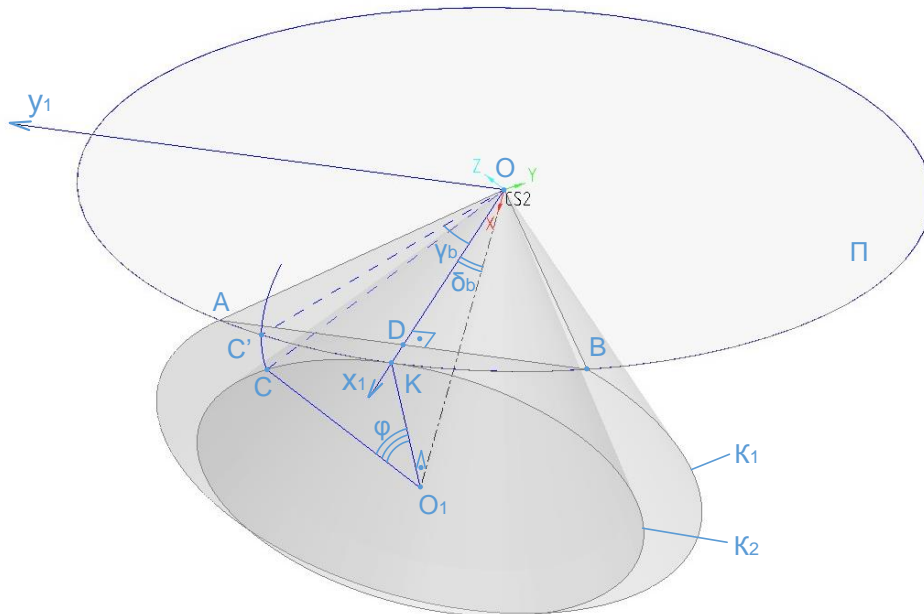


Рисунок 1 – Сферична евольвента

При перекочуванні без ковзання площини Π по основному конусу, відрізок CA , що лежить на цій площині, утворює бокову поверхню зуба. При цьому точка C' описує сферичну евольвенту, що відповідає зовнішньому торцевому січенню колеса. Маючи сферичну евольвенту, можна побудувати поверхню зуба. Для цього в Creo необхідно застосувати інструмент «Поверхня» і з'єднати криву сферичної евольвенти з вершиною конуса O .

Система координат xyz незмінно зв'язана з конічними поверхнями. Вісь Ox направлена вздовж осі OO_1 , а площина xOy проходить через точку C .

В якості аргументу для визначення положень точок C і C' вибрано кут φ повороту колеса. Діаметр основи основного конуса d_b , по якому перекочується дуга AB можна визначити із подібності трикутників $\triangle OFO_2$ і $\triangle OO_1K$ (рис. 2):

$$d_b = 2 \cdot OA \cos \alpha \cos(90 - \delta) = m_e z \cos \alpha, \quad (1)$$

де α – кут зачеплення;

δ – кут ділильного конуса шестерні (колеса);

m_e – торцевий модуль;

z – число зубів шестерні (колеса).

Координати точки C_1 в локальній системі координат $x_1y_1z_1$ [8]:

$$x_1 = OA \cos\left(\frac{d\varphi}{2 \cdot OA}\right), \quad y_1 = OA \sin\left(\frac{d\varphi}{2 \cdot OA}\right), \quad z_1 = 0. \quad (2)$$

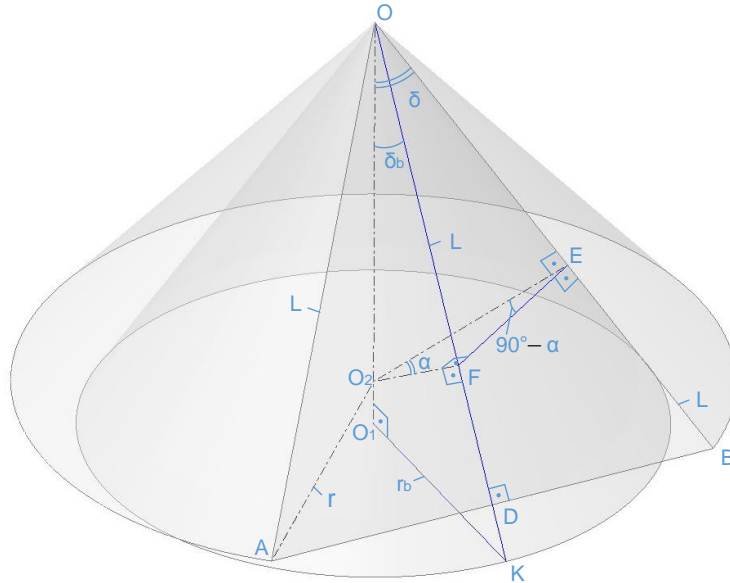


Рисунок 2 – Схема до визначення параметрів сферичної евольвенти

В роботі [8] координати x, y, z точки C' в системі $Oxyz$ визначено через координати x_1, y_1, z_1 цієї ж точки в системі $Ox_1y_1z_1$ за допомогою кутів Ейлера:

$$x = x_1 \cos \delta, \quad y = -x_1 \sin \delta \sin \varphi - y_1 \cos \varphi, \quad z = x_1 \sin \delta \cos \varphi + y_1 \sin \varphi. \quad (3)$$

Для утворення кругової поверхні зуба будується ряд сферичних евольвент із вибраним кроком, положення яких задається точкою M' , що лежить на дузі кола радіусом R_u (рис. 3). Положення точки M' задається через кут α_e та довжину відрізка l_e (рис. 4).

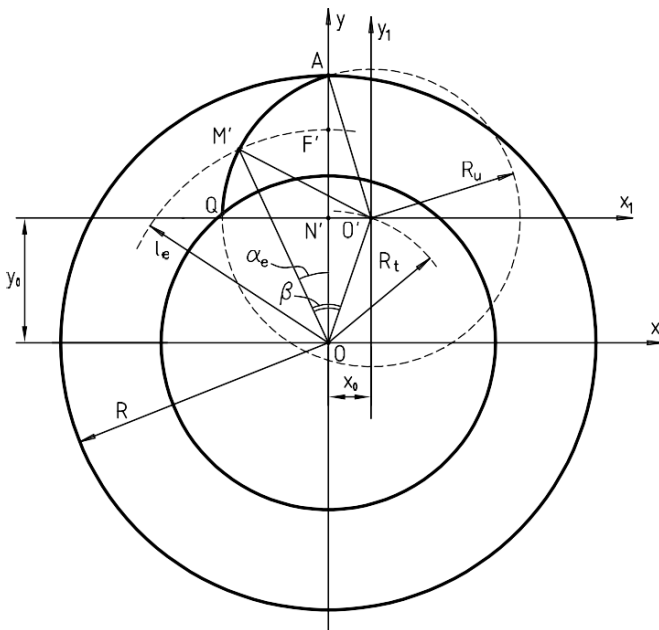


Рисунок 3 – Визначення параметрів утворюючого колеса з круговими зубами

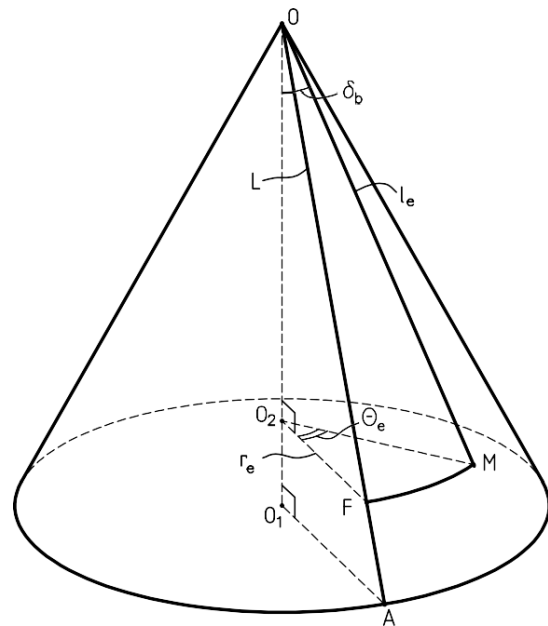


Рисунок 4 – Положення сферичної евольвенти на основному конусі колеса

На рисунку 3 $OA = R = L$, $y_0 = ON'$, $x_0 = N'O'$, тоді $N'O'$ знаходиться із формули:

$$S_{\square AO'O} = \frac{1}{2} OA \cdot O'N'.$$

З іншого боку площа $S_{\square AO'O}$ знаходиться з виразу:

$$S_{\square AO'O} = \sqrt{p(p-OA)(p-OO')(p-O'A)},$$

де

$$p = R_u + R_t + L.$$

$$x_0 = \frac{2 \cdot \sqrt{p(p-L)(p-R_t)(p-R_u)}}{L}$$

$$y_0 = \sqrt{R_t^2 - x_0^2}.$$

$$M'O'^2 = M'O^2 + OO'^2 - 2M'O \cdot OO' \cos \beta.$$

Звідси

$$\beta = \arccos \frac{l_e^2 + R_t^2 - R_u^2}{2l_e R_t}.$$

Оскільки

$$N'O = OO' \cos \angle N'OO',$$

то

$$\angle N'OO' = \arccos \frac{y_0}{R_t}.$$

Так як $\alpha_e = \beta - \angle N'OO'$, то остаточно отримано:

$$\alpha_e = \arccos \frac{l_e^2 + R_t^2 - R_u^2}{2l_e R_t} - \arccos \frac{y_0}{R_t}. \quad (4)$$

Довжина дуги FM рівна

$$FM = r_e \theta_e.$$

Так як $FM = F'M' = l_e \alpha_e$ та $r_e = l_e \sin \delta_b$, то

$$\theta_e = \frac{\alpha_e}{\sin \delta_b}. \quad (5)$$

Положення двох сусідніх бічних поверхонь впадини зубів (рис. 5) задається кутом ψ , який визначається за формулою:

$$\psi = \frac{m_e \cdot 180^0}{4r}.$$

Враховуючи, що $r = \frac{m_e \cdot z}{2}$, то

$$\psi = \frac{360^0}{4z}. \quad (6)$$

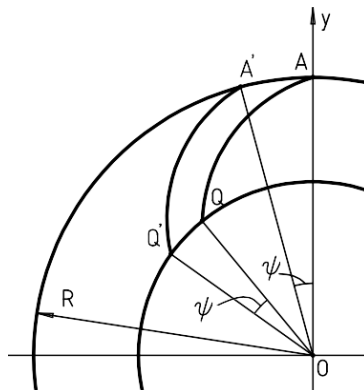


Рисунок 5 – Схема до визначення положення лінії зуба утворюючого колеса

Практичне застосування розробленої методики побудови зубів конічного колеса з круговим зубом показано із використанням програмного комплексу Сгео. Зокрема, на рисунку 6 наведено рівняння сферичної евольвенти у параметричній формі у вікні інструмента «Крива із рівняння».

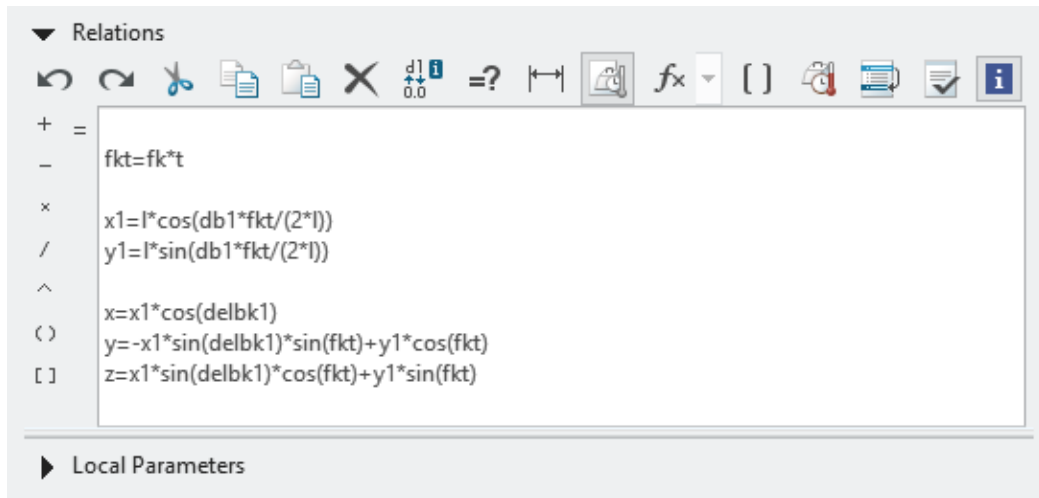


Рисунок 6 – Параметричні рівняння сферичної евольвенти

На рисунку 7а показано бокову поверхню зуба, що утворена за допомогою інструмента «Поверхня» спряженням сферичних евольвент. Завершену модель зубчастого колеса представлено на рисунку 7б.

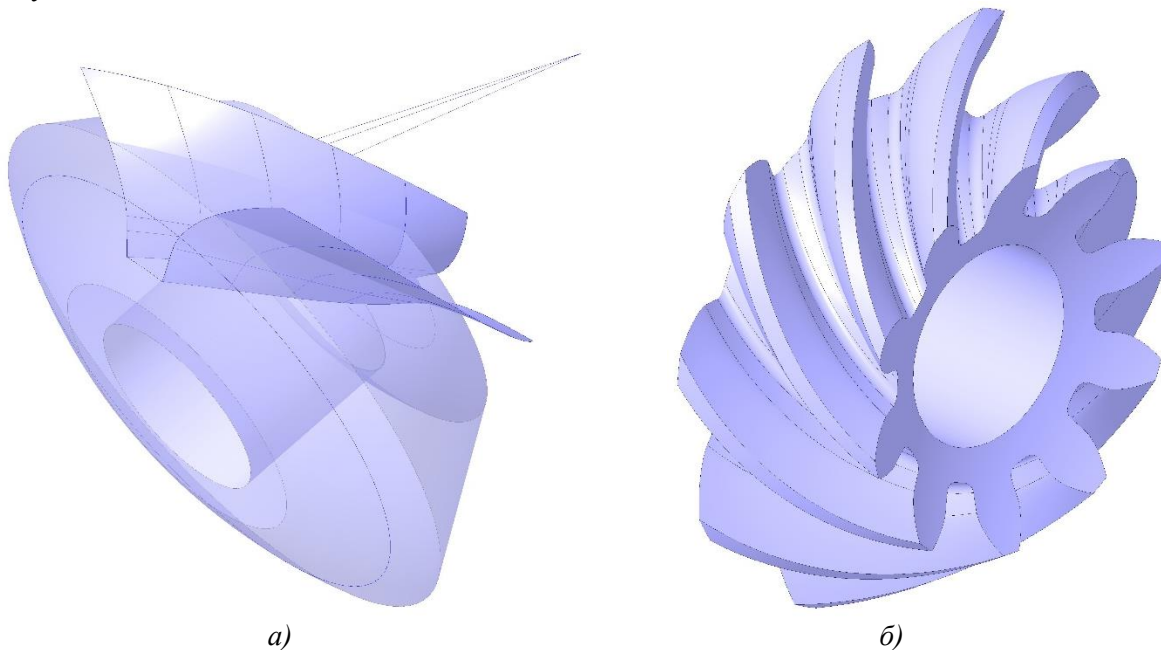


Рисунок 7 – Тримірна модель конічного зубчастого колеса із круговим зубом

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати підтверджують ефективність представленої методики побудови бічної поверхні зуба. Застосування сферичної евольвенти дозволяє значно спростити математичний опис профілю зуба, що суттєво полегшує його реалізацію засобами параметричного моделювання. Отримані моделі є стійкі до змін геометрії, що дозволяє швидко адаптувати конструкцію без втрати функціональності.

Застосування кривих, заданих параметричними рівняннями, в інструменті «Крива із рівняння» дає змогу із необхідною точністю відтворити складну геометрію сферичної евольвенти.

Перевагою запропонованого методу є можливість повної інтеграції побудованих моделей у конструкторське середовище Сгео, NX та Сатіа без потреби використання сторонніх плагінів для

імпорту зовнішніх моделей, що зберігає асоціативні зв'язки між елементами моделі та підвищує точність і надійність подальших етапів проектування.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на адаптацію методики для моделювання коліс із косими, спіральними та евольвентними зубами тощо. Варто також провести дослідження щодо автоматизації запропонованого процесу побудови за допомогою інструментів UDF, що доступні у CAD-програмах тримірного моделювання, або API функцій.

ВИСНОВОК

Розроблено методику для побудови конічної зубчастої передачі із круговим профілем зуба у середовищі тривимірного моделювання CAD-систем, які не мають вбудованих засобів автоматизованого проектування елементів такого типу.

Для формування профілю зуба за геометричну основу використовується сферична евольвента. Такий метод спрощує математичний опис та забезпечує високу точність побудови.

Застосування параметричних рівнянь та зазначених інструментів побудови кривих дозволяє зберегти повну параметризацію моделі та забезпечує асоціативність усіх елементів моделі, що є особливо важливим при використанні «низхідного» моделювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Павлюк В.І., Булік Ю.В., Сітовський О.П. (2024). Проектування технологічного обладнання «низхідним» моделюванням із застосуванням скелетонів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал, 1 (22), С. 279–284. / URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1370>.
2. Camnetics, Inc. [Електронний ресурс]: офіційний сайт. URL: <https://camnetics.com/>
3. Bevel Gear: Fundamentals and Applications. Jan Klingelberg. Publisher: Springer Vieweg. Year: 2016 – 328 p.
4. Gleason Bevel Gear Technology: Basics of Gear Engineering and Modern Manufacturing Methods for Angular Transmissions. Hermann J. Stadtfeld, Gleason Works (Rochester, N.Y.). Publisher: Gleason Works, 2014 – 503 p.
5. Gear Geometry and Applied Theory. Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes. Publisher: Cambridge University Press, 2004 – 800 p.
6. Gears: Volume 1: Geometric and Kinematic Design. Vullo, Vincenzo. Publisher: Springer International Publishing, 2020 – 844 p.
7. Creo Parametric 8.0: Advanced Assembly Design and Management by Ascent - Center for Technical Knowledge (Author). Publisher: ASCENT, Center for Technical Knowledge (November 20, 2023). – 652 p.
8. Пустюльга С.І., Гандзюк М.О., Булік Ю.В. Основи проектування в ProENGINEER Навчальний посібник. – Луцьк: Редакційно-видавничий відділ ЛНТУ, 2012. – 281с.
9. Fuentes-Aznar, A., Gonzalez-Perez, I., & Pasapula, H. K. (2017, February 27). Computerized design of straight bevel gears with optimized profiles for forging, molding, or 3D printing. Thermal Processing. URL: <https://thermalprocessing.com/computerized-design-of-straight-bevel-gears-with-optimized-profiles-for-forging-molding-or-3d-printing/>

REFERENCES

1. Pavliuk V.I., Bulik Yu.V., Sitovskiy O.P. (2024). Proektuvannia tekhnolohichnoho obladnannia «nyzkhidnym» modeliuvanniam iz zastosuvanniam skeletoniv. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyi zhurnal, 1 (22), S. 279–284. / URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1370>.
2. Camnetics, Inc. URL: <https://camnetics.com/>
3. Bevel Gear: Fundamentals and Applications. Jan Klingelberg. Publisher: Springer Vieweg. Year: 2016 – 328 p.
4. Gleason Bevel Gear Technology: Basics of Gear Engineering and Modern Manufacturing Methods for Angular Transmissions. Hermann J. Stadtfeld, Gleason Works (Rochester, N.Y.). Publisher: Gleason Works, 2014 – 503 p.
5. Gear Geometry and Applied Theory. Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes. Publisher: Cambridge University Press, 2004 – 800 p.
6. Gears: Volume 1: Geometric and Kinematic Design. Vullo, Vincenzo. Publisher: Springer International Publishing, 2020 – 844 p.
7. Creo Parametric 8.0: Advanced Assembly Design and Management by Ascent - Center for Technical Knowledge (Author). Publisher: ASCENT, Center for Technical Knowledge (November 20, 2023). – 652 p.
8. Pustiulha S.I., Handziuk M.O., Bulik Yu.V. Osnovy proektuvannia v ProENGINEER Navchalnyi posibnyk. – Lutsk: Redaktsiino vydavnychiy viddil LNTU, 2012. – 281s.

9. Fuentes-Aznar, A., Gonzalez-Perez, I., & Pasapula, H. K. (2017, February 27). Computerized design of straight bevel gears with optimized profiles for forging, molding, or 3D printing. Thermal Processing. URL: <https://thermalprocessing.com/computerized-design-of-straight-bevel-gears-with-optimized-profiles-for-forging-molding-or-3d-printing/>

Y. Bulik, V. Pavliuk, N. Kuts, V. Onyshchuk. Features of modeling bevel gear wheels with circular tooth profile in 3d modeling software

A methodology for designing bevel gears with circular tooth profiles in 3D CAD systems is presented. Due to the lack of built-in tools for creating such types of mechanisms on platforms such as Creo, NX, and Catia, a special approach to parametric modeling is proposed. The method is based on the construction of a spherical involute surface, which simplifies the mathematical description of the gear geometry and ensures high modeling accuracy. The use of parametric equations provides full associativity in the CAD environment, facilitating rapid design changes and integration into broader engineering systems. Special attention is paid to the step-by-step procedure for designing this type of gear in the Creo 3D modeling environment. This ensures the practical applicability and reproducibility of the method for engineering purposes. The developed approach is also well consistent with additive manufacturing processes, allowing the generated models to be directly used for 3D printing without further modifications. This significantly speeds up the prototyping and production process. The effectiveness of the methodology is proven through implementation in Creo and can be adapted for other types of gears, including helical, spiral and involute teeth. The need to automate the proposed construction process using UDF tools available in 3D CAD programs or API functions is indicated.

Key words: design, gear meshing, circular tooth, spherical involute, parameterization, assembly.

БУЛІК Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

ПАВЛЮК Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0678-3566>

КУЦЬ Надія Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету, e-mail: nadia86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

ОНИЩУК Василь Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

Yurii BULIK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>

Vasyl PAVLIUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0678-3566>

Nadiia KUTS, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: nadia86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Vasyl ONYSHCHUK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: Vasyl.Onyshchuk@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1717