

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-13-18>

УДК 621.91.02

## ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ З CAE-СИСТЕМАМИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДИСКОВИХ ЗУБОРІЗНИХ ФРЕЗ У СЕРЕДОВИЩІ PTC CREO PARAMETRIC

**Логунів О.М.**

## PARAMETRIC MODELING AND INTEGRATION WITH CAE SYSTEMS IN THE DESIGN OF DISK GEAR CUTTERS IN PTC CREO PARAMETRIC ENVIRONMENT

**Lohunov O.M.**

У статті розглядається актуальна проблема підвищення ефективності проектування складного металорізального інструменту в умовах сучасного машинобудування. Об'єктом дослідження є дискові зуборізні фрези, призначені для нарізування циліндричних зубчастих коліс методом копіювання. Оскільки ці інструменти є стандартизованими та виготовляються комплектами (зазвичай з 8, 15 або 26 фрез на кожен модуль залежно від необхідної точності), вони виступають ідеальним об'єктом для застосування методів автоматизації параметричного проектування. В роботі обґрунтовано перехід від застарілих методів моделювання, що використовували наближені побудови сплайнами по характерних точках (характерні для систем типу APM WinMachine), до точного математичного моделювання у CAD-системах високого рівня, таких як PTC Creo Parametric. Авторами представлено комплексну методичку створення повністю адаптивної 3D-моделі зуборізної фрези. Основою запропонованого підходу є використання інструменту «Parameters» як центрального вузла керування змінними (модуль, число зубів, кут профілю) та інструменту «Relations» для встановлення математичних залежностей розрахунку похідних геометричних характеристик (ділильний діаметр, діаметри кіл вершин та западин). Важливою частиною роботи є розрахунок та побудова точної геометрії різального зуба. У статті детально описано процес генерації евольвентного профілю за допомогою теоретичних рівнянь у декартових координатах через функцію «Equation Driven Curve» з подальшим віддзеркаленням профілю відносно площини симетрії зуба. Крім того, за допомогою рівняння спіралі Архімеда в циліндричних координатах змодельовано

специфічну геометрію затилованої поверхні, що необхідно для забезпечення задніх кутів під час різання. Особливу увагу приділено автоматизації проектування за допомогою інструменту «Family Table», який дозволяє генерувати весь номенклатурний ряд комплекту фрез з однієї базової моделі без ручної перебудови. Також у статті висвітлено питання інтеграції CAD-моделі з CAE-системою ANSYS для проведення інженерного аналізу. Описано послідовність виконання статичного, динамічного (модального) та зв'язаного термоструктурного аналізів, необхідних для оцінки міцності, вібростійкості та термостабільності інструменту під дією робочих навантажень. Результатом роботи є верифікована методика, що значно скорочує час проектування, мінімізує помилки та готує модель до складних розрахунків на міцність.

**Ключові слова:** параметричне моделювання, дискова зуборізна фреза, PTC Creo Parametric, евольвента, спіраль Архімеда, CAE-аналіз, Family Table.

**Вступ.** В сучасних умовах машинобудування вимоги до точності, швидкості проектування та гнучкості виробництва зросли експоненціально. Параметричне моделювання стає критично важливим інструментом для оптимізації виробничих процесів, дозволяючи інженерам швидко адаптувати конструкції під специфічні потреби замовника, що є ключовим фактором конкурентоспроможності в аерокосмічній, автомобільній та медичній галузях [1-5]. Особливої актуальності це набуває при

проектуванні складного різального інструменту, такого як дискові зуборізні фрези. Ці інструменти призначені для нарізування зубчастих коліс методом копіювання, що вимагає високої відповідності профілю інструменту профілю западини деталі. Фрези традиційно виготовляються комплектами (з 8, 15 або 26 номерів) для кожного модуля.

Попередній стан речей у проектуванні таких фрез характеризувався використанням наближених методів. Традиційно, для побудови профілю конструктори використовували нормалізовані таблиці координат точок евольвентної частини ( $x$ ,  $y$ ), наведені у довідковій літературі та стандартах (наприклад, для модуля  $m=100$  мм з подальшим перерахунком). При використанні попередніх поколінь CAD-систем (зокрема, APM WinMachine), побудова контуру здійснювалася шляхом нанесення цих точок на ескіз та їх з'єднання за допомогою сплайнів або дуг кіл (для профілів типу I та II)[6]. Такий підхід мав суттєві недоліки: трудомісткість ручного введення координат, залежність точності від кількості точок та немінуча похибка інтерполяції сплайну між вузловими точками. Перехід на сучасні системи високого рівня, такі як PTC Creo Parametric, відкриває нові можливості. Ця система дозволяє замінити дискретну апроксимацію неперервним математичним описом, мінімізувати людські помилки та забезпечити повну асоціативність моделі, креслення та розрахункових даних [7-9]

**Мета статті.** Розробка методики параметричного 3D-моделювання дискових зуборізних фрез у середовищі PTC Creo Parametric із застосуванням точних аналітичних рівнянь та підготовка моделі до інтегрованого інженерного аналізу в системі ANSYS.

**Результати дослідження.** Методика параметричного моделювання: Керування параметрами

Основою запропонованої методики є відмова від «жорсткої» геометрії на користь повністю керованої моделі. Ключовим інструментом для організації та автоматизації створення моделі є Таблиця параметрів (Parameters). Вона слугує єдиним центром управління всіма змінними, що визначають геометрію та характеристики фрези. Замість того, щоб вручну вводити розміри для кожного елемента, конструктор задає базові змінні: модуль (MODULE), кількість зубів

(NO\_OF\_TEETH), кут профілю (PRESSURE\_ANGLE), діаметр посадкового отвору та зовнішній діаметр.

Математичні та логічні залежності між параметрами встановлюються через інструмент Relations (Рівняння). Це дозволяє автоматично обчислювати похідні величини (ділительний діаметр, діаметри кіл вершин та западин) при зміні вхідних даних. Наприклад, зміна модуля автоматично перераховує всі залежні розміри, що виключає арифметичні помилки та гарантує геометричну цілісність моделі [4, 5]. Такий підхід також дозволяє стандартизувати моделі в різних проектах, хоча слід бути обережним, щоб уникнути «надмірного обмеження» (over-constraining) моделі, яке може ускладнити подальше редагування [6].

Критичним аспектом якості зуборізної фрези є точність її профілю, оскільки він безпосередньо копіюється на деталь. У класичному підході евольвентна ділянка будувалася наближено по характерних точках (зазвичай 8–15 точок на висоту зуба). Сплайн, що проходить через ці точки, має відхилення від теоретичної евольвенти, особливо на ділянках зі змінною кривизною.

У середовищі Creo Parametric реалізовано побудову через інструмент Equation Driven Curve (Крива за рівнянням)[10]. Профіль задається системою точних рівнянь у декартових координатах:

$$\begin{aligned} x &= r_{base} \cdot \cos(t \cdot \theta_{max}) \\ &+ r_{base} \cdot t \cdot \theta_{max} \cdot \sin(t \cdot \theta_{max}) \\ y &= r_{base} \cdot \sin(t \cdot \theta_{max}) - \\ &r_{base} \cdot t \cdot \theta_{max} \cdot \cos(t \cdot \theta_{max}) \end{aligned} \quad (1)$$

де  $r_{base}$  — радіус основного кола, а параметр  $t$  змінюється від 0 до 1

Кількісне порівняння показує, що використання параметричних рівнянь дозволяє усунути похибку апроксимації, яка при сплайновому методі може досягати 0.01–0.05 мм. Більше того, параметризація дозволяє миттєво генерувати унікальний інструмент під конкретне число зубів (наприклад,  $z=30$ ), усуваючи методичну похибку універсальних комплектів фрез, розрахованих на діапазон чисел зубів.

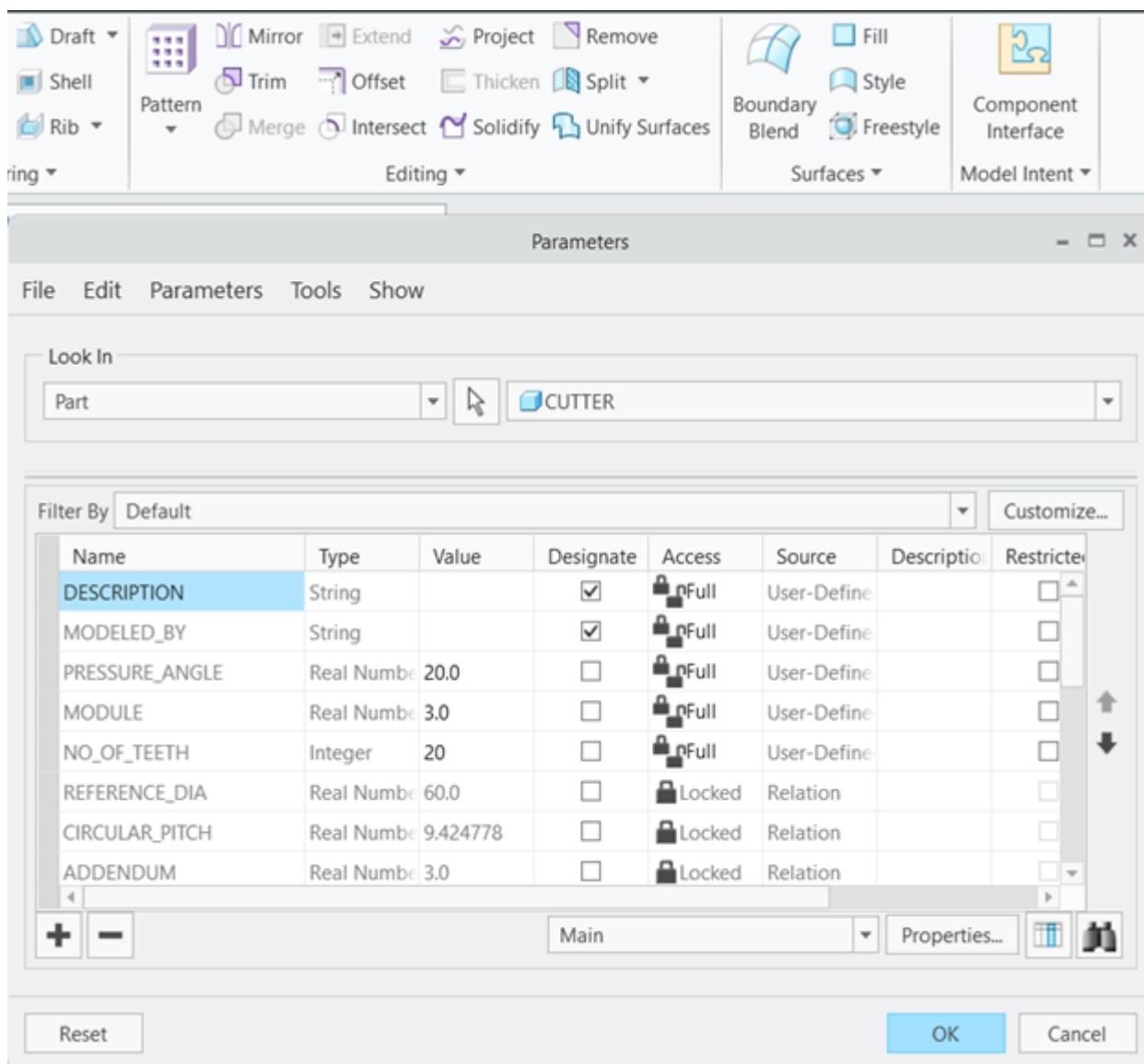


Рис. 1. Таблиця параметрів у середовищі PTC Creo Parametric

Специфікою зуборізних фрез є необхідність затилювання задньої поверхні зуба для забезпечення задніх кутів різання при збереженні профілю після переточувань. У Creo Parametric це реалізується за допомогою операції Sweep (Протягування) вздовж траєкторії. Як траєкторія використовується крива, описана рівнянням спіралі Архімеда в циліндричних координатах:

$$r = IR + (OR - IR) \cdot t \quad (2)$$

де  $IR$  та  $OR$  — внутрішній та зовнішній радіуси ділянки спіралі.

Оскільки фрези виготовляються комплектами, моделювати кожну фрезу окремо неефективно. Інструмент Family Table (Таблиця

сімейства) дозволяє створити базову модель (generic) і на її основі автоматично згенерувати всі варіанти виконань (instances) — від №1 до №8. Кожен варіант успадковує логіку побудови, але має унікальні значення параметрів. Це скорочує час на розробку комплекту у 8–10 разів порівняно з ручним моделюванням кожної одиниці [2].

Створена параметрична модель містить повний набір геометричних та фізичних даних, що дозволяє безшовно передавати її в системи інженерного аналізу (CAE), такі як ANSYS. Це відкриває можливості для проведення комплексних досліджень:

- Статичний аналіз: перевірка міцності зуба на згин під дією сили різання.
- Модальний аналіз: визначення власних частот для уникнення резонансу.

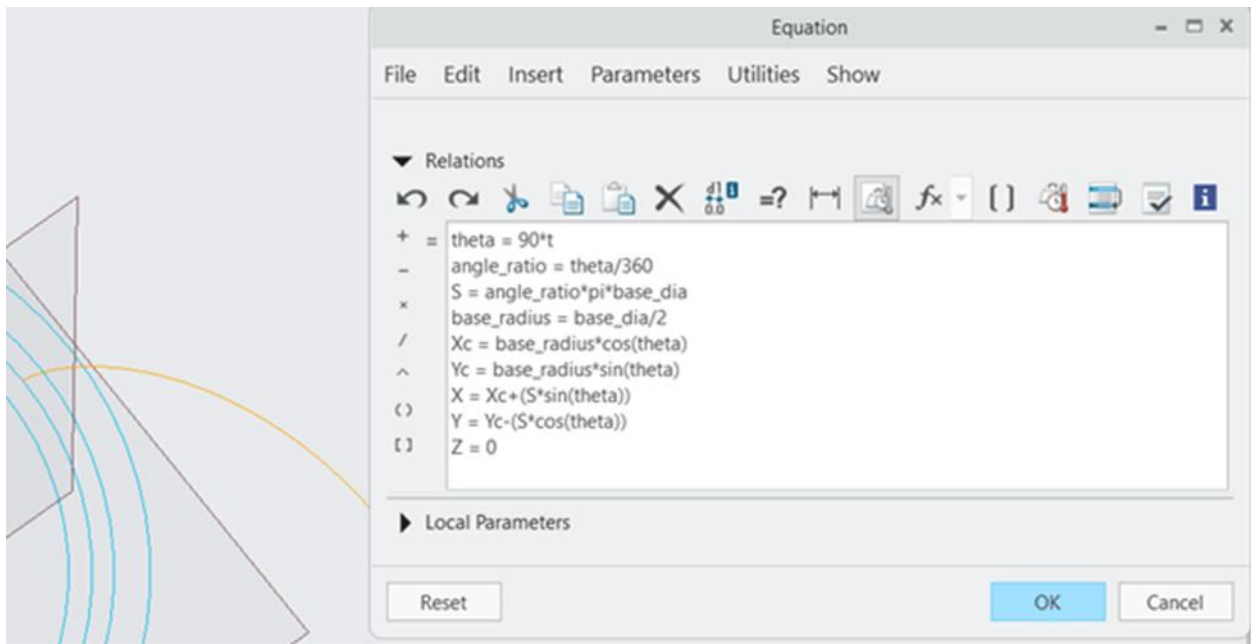


Рис. 2. Побудова евольвенти за допомогою параметричних рівнянь

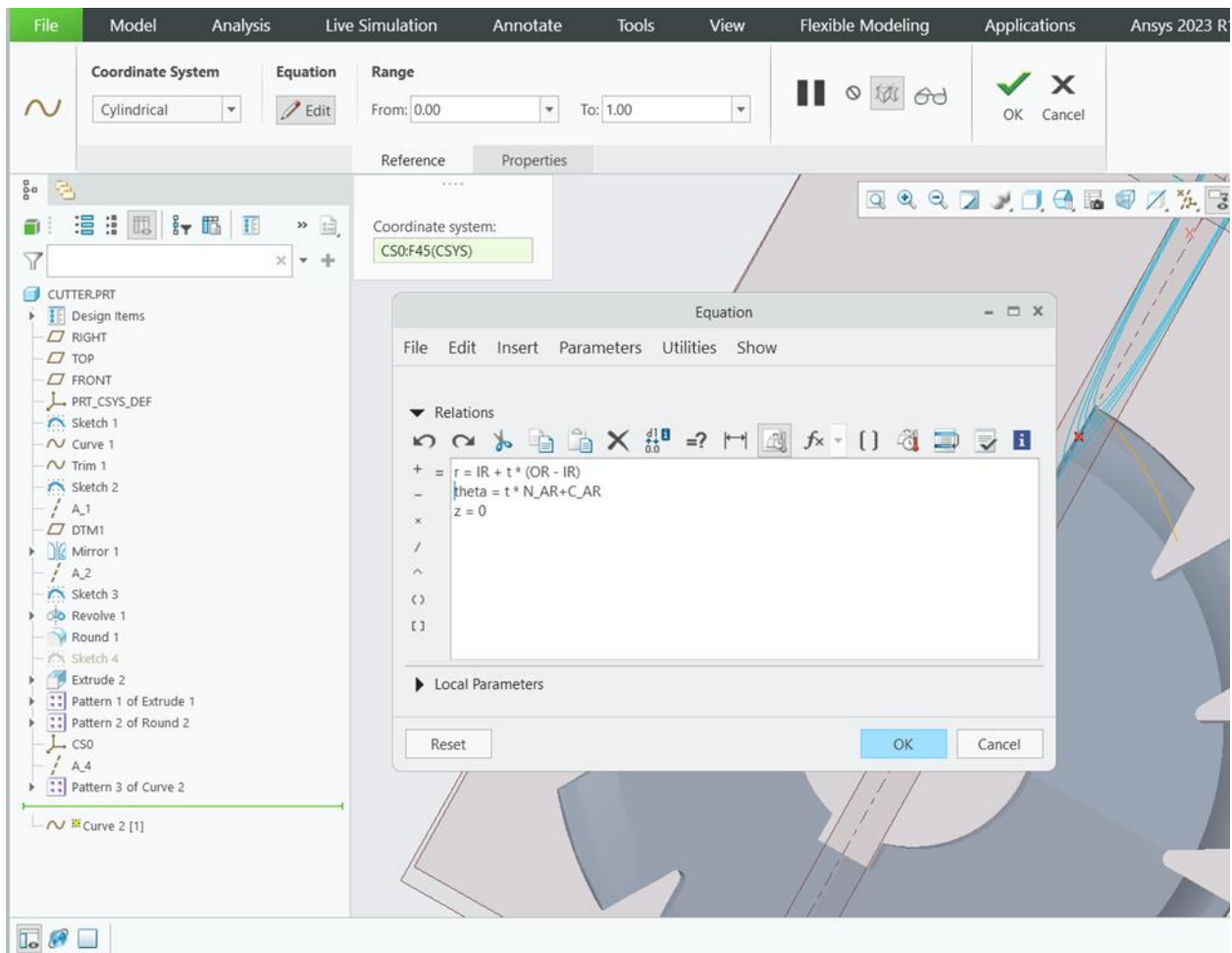


Рис. 3. Використання спіралі Архімеда для формування задньої поверхні зуба



Рис. 4. Тривимірний модель дискової зуборізної фрези

- Термоструктурний аналіз: оцінка впливу температурних деформацій на точність профілю.

Майбутнє параметричного моделювання пов'язане з інтеграцією штучного інтелекту (AI) та хмарних обчислень. AI може автоматизувати оптимізацію параметрів на основі історичних даних про стійкість інструменту, а хмарні платформи забезпечать спільну роботу команд у реальному часі [4]. Впровадження таких технологій дозволить створювати «розумні» цифрові двійники інструменту для моніторингу його стану в процесі експлуатації.

**Висновки.** Перехід від таблично-сплайнових методів до параметричного моделювання рівняннями в PTC Creo Parametric дозволяє підвищити точність профілю дискових фрез, усуваючи похибки інтерполяції та ручного введення даних.

Параметризація забезпечує виняткову гнучкість дизайну, дозволяючи проектувати як стандартні комплекти фрез, так і спеціальний інструмент під конкретне число зубів колеса за лічені хвилини.

Використання інструментів Family Table та інтеграція з CAE-системами створюють єдиний цифровий простір для проектування, розрахунку та підготовки виробництва, що відповідає концепції Індустрії 4.0.

Використання точних математичних рівнянь для побудови евольвенти та спіралі Архімеда гарантує коректність профілю інструменту.

Параметризація моделі через Parameters та Relations у поєднанні з Family Table дозволяє автоматизувати створення всього номенклатурного ряду фрез. Крім того, створена параметрична модель повністю готова до

передачі в CAE-системи (ANSYS) для проведення термоструктурного аналізу, що підвищує надійність проектування.

### Література

1. Comprehensive Guide to Parametric Modeling. Ikarus3D. URL: <https://ikarus3d.com/comprehensive-guide-to-parametric-modeling> (дата звернення: 26.11.2025).
2. How to Master Parametric Design for Manufacturing in 2024. Scan2CAD. URL: <https://www.scan2cad.com> (дата звернення: 26.11.2025).
3. The Pros and Cons of Parametric Modeling. Concurrent Engineering. URL: <https://www.concurrent-engineering.co.uk> (дата звернення: 26.11.2025).
4. Revolutionizing Gear Technology: Innovations and Startups in 2024. StartUs Insights. URL: <https://www.startus-insights.com> (дата звернення: 26.11.2025).
5. In-depth Guide on Parametric Design for All Industries. Marketing Psycho. URL: <https://www.marketing-psycho.com/parametric-design> (дата звернення: 26.11.2025).
6. Кроль О. С., Шумакова Т. О., Соколов В. І. Проектування зуборізних інструментів з використанням системи КОМПАС : навч. посіб. Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2013. 144 с.
7. Романченко О. В., Боровик П. В. та ін. Методичні вказівки до практичного заняття за темою «Проектування дискових зуборізних фрез» з дисципліни «Різальний інструмент». Київ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2025. 35 с.
8. Романченко О. В., Логунов О. М. та ін. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи CAD, CAM, CAE». Частина I. Побудова тривимірної моделі валу в CAD-системі PTC Creo. Київ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2024. 24 с.
9. Романченко О. В., Логунов О. М. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи CAD, CAM, CAE». Частина II. Генерація креслень з тривимірної моделі валу в CAD-системі PTC Creo. Северодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2020. 20 с.
10. Creo Help Center. PTC. URL: <https://www.ptc.com/en/support/help/creo> (дата звернення: 26.11.2025).

### References

1. Comprehensive Guide to Parametric Modeling. Ikarus3D. URL: <https://ikarus3d.com/comprehensive-guide-to-parametric-modeling> (date of access: 26.11.2025).
2. How to Master Parametric Design for Manufacturing in 2024. Scan2CAD. URL: <https://www.scan2cad.com> (date of access: 26.11.2025).
3. The Pros and Cons of Parametric Modeling. Concurrent Engineering. URL:

- <https://www.concurrent-engineering.co.uk> (date of access: 26.11.2025).
4. Revolutionizing Gear Technology: Innovations and Startups in 2024. StartUs Insights. URL: <https://www.startus-insights.com> (date of access: 26.11.2025).
  5. In-depth Guide on Parametric Design for All Industries. Marketing Psycho. URL: <https://www.marketing-psycho.com/parametric-design> (date of access: 26.11.2025).
  6. Krol O. S., Shumakova T. O., Sokolov V. I. Proektuvannia zuboriznykh instrumentiv z vykorystanniam systemy KOMPAS: navch. posib. Luhansk : V. Dahl EUNU Publ., 2013. 144 p.
  7. Romanchenko O. V., Borovik P. V. et al. Metodychni vkazivky do praktychnoho zaniattia za temoiu «Proektuvannia dyskovykh zuboriznykh frez». Kyiv : V. Dahl EUNU Publ., 2025. 35 p.
  8. Romanchenko O. V., Lohunov O. M. et al. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat z dystsypliny «Osnovy CAD, CAM, CAE». Chastyna I. Kyiv : V. Dahl EUNU Publ., 2024. 24 p.
  9. Romanchenko O. V., Lohunov O. M. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat z dystsypliny «Osnovy CAD, CAM, CAE». Chastyna II. Sievierodonetsk : V. Dahl EUNU Publ., 2020. 20 p.
  10. Creo Help Center. PTC. URL: <https://www.ptc.com/en/support/help/creo> (date of access: 26.11.2025).

**Lohunov O. Parametric modeling and integration with CAE systems in the design of disk gear cutters in PTC Creo Parametric environment**

*The article addresses the urgent problem of improving the efficiency of designing complex metal-cutting tools in the context of modern mechanical engineering. The object of the study is disk gear cutters designed for cutting spur gears using the copying method. Since these tools are standardized and manufactured in sets (typically comprising 8, 15, or 26 cutters per module depending on the required accuracy), they represent an ideal object for applying parametric design automation methods. The paper substantiates the transition from obsolete modeling methods, which used approximate spline constructions based on characteristic*

*points (characteristic of systems like APM WinMachine), to precise mathematical modeling in high-level CAD systems such as PTC Creo Parametric. The authors present a comprehensive methodology for creating a fully adaptive 3D model of a gear cutter. The core of the proposed approach is the use of the Parameters tool as a central control unit for variables (module, number of teeth, pressure angle) and the Relations tool to establish mathematical dependencies for calculating derived geometric characteristics (pitch, base, and root diameters). A significant part of the study is calculating and building the exact geometry of the cutting tooth. The article details the process of generating the involute profile using theoretical equations in Cartesian coordinates via the "Equation Driven Curve" feature, followed by mirroring the profile relative to the tooth symmetry plane. Furthermore, the specific geometry of the relief surface (backing off), which is necessary to ensure proper clearance angles during cutting, is modeled using the Archimedean spiral equation in cylindrical coordinates. Special attention is paid to design automation using the Family Table tool, which allows generating the entire nomenclature range of the cutter set from a single generic model without manual rebuilding. The article also covers the integration of the CAD model with the CAE system ANSYS for engineering analysis. It describes the sequence of static, dynamic (modal), and coupled thermal-structural analyses required to evaluate the tool's strength, vibration resistance, and thermal stability under operating loads. The result of the work is a verified technique that significantly reduces design time, minimizes errors, and prepares the model for complex strength calculations.*

**Key words:** parametric modeling, disk gear cutter, PTC Creo Parametric, involute curve, Archimedean spiral, CAE analysis, Family Table.

**Логунов О.М.** – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [logunov@snu.edu.ua](mailto:logunov@snu.edu.ua)

Стаття подана 09.11.2025.