



ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ

УДК 621:744:004.92

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.19479322>

Інтеграція параметричних допусків і посадок у середовище 3D- моделювання.

Цись Олег Олександрович

кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри технологічної та професійної освіти, Криворізький державний педагогічний університет, м. Кривий Ріг, проспект Університетський, 54, 50086, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-1496-1331>

Прийнято: 25.03.2026 | Опубліковано: 09.04.2026

***Анотація:** У статті теоретично обґрунтовано та представлено методику інтеграції параметричних допусків і посадок у тривимірне геометричне ядро CAD-моделей для створення єдиного цифрового інформаційного простору. Робота спрямована на подолання розриву між статичним візуальним представленням точності на кресленнях та динамічними потребами автоматизованих систем виробництва, де модель має виступати цифровим носієм усіх технічних атрибутів. Методи дослідження базуються на системному аналізі принципів CALS-технологій, застосуванні методів параметричного та геометричного моделювання, а також на алгоритмізації процесів звернення до цифрових баз нормативних даних стандартів ISO та ДСТУ. У роботі використано підходи інтерполяції точкових рядів для опису просторових поверхонь та методи аналізу розмірних ланцюгів у тривимірному середовищі для валідації збираності вузлів. Результати дослідження дозволили сформулювати алгоритм функціонування цифрової 3D-моделі, у якій геометричні*



параметри пов'язані математичними залежностями з його функціональними характеристиками точності. Встановлено, що така інтеграція забезпечує автоматичне коригування геометрії залежно від обраного квалітету, що мінімізує етап ручного перетворення даних при переході до систем САМ та СММ. Доведено, що впровадження запропонованої методики дозволяє підвищити точність матеріалізації моделей адитивними та субтрактивними методами за рахунок використання «аналітичного еталона деталі». Висновки дослідження підтверджують, що запропонований підхід докорінно змінює методологію навчання майбутніх фахівців, забезпечуючи формування у них якісно нових компетентностей що підвищує рівень їхньої професійної адаптивності до реальних виробничих задач. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі вбачаються у розробці спеціалізованих плагінів для хмарних САД-платформ, які дозволять здійснювати колективне проектування складних вузлів із автоматичним узгодженням розмірних ланцюгів у реальному часі.

Ключові слова: автоматизація проектування, параметричні допуски, 3D-моделювання, взаємозамінність, системи САД/САМ, цифрова стандартизація.

Integration of Parametric Tolerances and Fits into a 3D Modeling Environment

Oleh Tsys

PhD in Education, Associate Professor, Head of the Department of Technological and Professional Education, Kryvyi Rih State Pedagogical University, 54 Universytetskyi Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine,

<https://orcid.org/0000-0003-1496-1331>

Abstract: *The article theoretically substantiates and presents a methodology for integrating parametric tolerances and fits into the three-dimensional geometric*



kernel of CAD models to create a unified digital information space. The work is aimed at overcoming the gap between the static visual representation of accuracy on drawings and the dynamic needs of automated production systems, where the digital model must act as a digital carrier of all technical attributes. The research methods are based on a systematic analysis of CALS-technology principles, the application of parametric and geometric modelling methods, as well as the algorithmization of processes for accessing digital databases of ISO and DSTU regulatory data. The work uses point-row interpolation approaches to describe spatial surfaces and dimensional chain analysis methods in a three-dimensional environment to validate assembly. The research results allowed for the formation of an algorithm for the functioning of a digital 3D model, in which geometric parameters are linked by mathematical dependencies with its functional accuracy characteristics. It has been established that such integration provides automatic geometry adjustment depending on the selected quality class (grade), which minimizes the manual data conversion stage during the transition to CAM and CMM systems. It is proved that the implementation of the proposed methodology allows for increasing the accuracy of model materialization by additive and subtractive methods through the use of an "analytical part reference." The study's conclusions confirm that the proposed approach radically changes the methodology of training future specialists, ensuring the formation of qualitatively new competencies, which increases the level of their professional adaptability to real production tasks. Prospects for further research in this area are seen in the development of specialized plugins for cloud CAD platforms, which will allow for the collective design of complex units with automatic coordination of dimensional chains in real-time.

Keywords: *design automation, parametric tolerances, 3D modelling, interchangeability, CAD/CAM systems, digital standardization.*



Постановка проблеми. В умовах переходу сучасного машинобудування до змішаного використання людино- та машинно-орієнтованих технологій спостерігається «невідповідність між традиційними засобами подання інформації (кресленнями) та вимогами автоматизованих систем, що потребують точних аналітичних моделей» [4, с. 101]. Використання двох паралельних мов опису – нарисної та аналітичної геометрії порушує принцип єдності інформаційного простору, створюючи розрив між геометричною формою виробу та його технічними атрибутами. Проблема поглиблюється складністю матеріалізації CAD-моделей. Сучасні дослідження вказують на те, що при виготовленні складних виробів, точність формоутворення безпосередньо залежить від адаптивного поділу 3D-моделі на шари, що вимагає динамічного врахування відхилень та допусків ще на етапі проектування [5]. У той же час, метрологічне забезпечення повинно гарантувати взаємозамінність та відповідність параметрів поверхневого шару номінальним розмірам, що практично неможливо без створення інтегрованого механізму передачі даних про посадки безпосередньо в 3D-середовищі [14].

Додатковим викликом є необхідність підготовки фахівців, здатних працювати в таких інтегрованих системах. Дослідниця Г. Райковська наголошує, що сучасна геометро-графічна підготовка в ЗВО повинна базуватися на формуванні професійних компетентностей засобами САПР, де студенти опановують не просто креслення, а геометричне моделювання з урахуванням фізико-механічних характеристик деталей [9]. Таким чином, відсутність цілісної методики автоматичного призначення та перерахунку параметричних допусків у тривимірному просторі а також великий розрив між етапами проектування, виготовлення та метрологічного контролю деталей робить дане дослідження актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел свідчить про глибоке опрацювання науковою спільнотою питань цифрової



трансформації машинобудування, де інтеграція параметричних допусків у 3D-середовище є ключовим елементом. Дослідники І. В. Бичков, І. М. Лисоченко та інші наголошують на критичній невідповідності між традиційними 2D-кресленнями та сучасними вимогами автоматизованих систем, пропонуючи концепцію Аналітичного Еталону Деталі (АЕД) як єдиної цифрової моделі з повним комплексом технологічних атрибутів [4]. Важливість метрологічного аспекту в цьому процесі підкреслюють О. В. Горбенко та Г. О. Лапенко, які розглядають методика керування якістю поверхні з урахуванням взаємозамінності, що є фундаментальним для параметризації посадок [14].

Технологічна підготовка виробництва в контексті 3D-моделювання детально аналізується у роботі Я. М. Гаращенка, де акцент робиться на точності пошарового формоутворення та статистичному аналізі відхилень від правильної геометричної форми [5]. Вчена Г. О. Райковська обґрунтовує необхідність формування професійних компетентностей у майбутніх інженерів саме засобами САПР, що дозволяє фахівцям ефективно працювати з інноваційними методиками проектування [9]. Дослідники Ю. Холодняк, О. Мацулевич, Є. Гавриленко наголошують на важливості використання CAD-систем, зокрема SolidWorks, як інструменту для вирішення нестандартних практичних задач, що вимагають високої точності геометричних характеристик [7, 8]. Автори робіт з розробки технологій формування CAD-моделей поверхонь технічних виробів вказують на необхідність створення лінійних каркасних елементів, що є критично важливим для точного визначення полів допусків у просторі [2].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Результати аналізу останніх наукових досліджень показали, що попри значний прогрес у розробці CAD-моделей, проблема інтеграції параметричних допусків і посадок у 3D-середовище залишається розв'язаною лише фрагментарно. На сьогодні основними невирішеними частинами загальної проблеми є відсутність



універсальних алгоритмів для динамічного зв'язку між аналітичним описом просторових кривих та табличними даними стандартів точності. Більшість існуючих рішень, зосереджені на формуванні геометричного каркаса або візуалізації PMI-даних, проте механізм автоматичного перерахунку геометрії моделі залежно від обраного квалітету в реальному часі залишається недосконалим. Також не до кінця розробленою є методика автоматизованої передачі даних про посадки безпосередньо до САМ-систем для адаптивного вибору режимів обробки деталей.

Важливість даної статті полягає у спробі подолати цей технологічний розрив шляхом розробки методології, де допуск стає не просто текстовою анотацією на екрані, а активним параметром математичної моделі виробу. Наукова цінність роботи зумовлена розвитком теорії параметричного моделювання складних поверхонь, що дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та значно підвищити точність формоутворення при матеріалізації 3D-моделей. Практична значущість дослідження підтверджується можливістю впровадження запропонованих підходів у освітній процес закладів вищої освіти. Таким чином, дана стаття закладає підґрунтя для створення інтелектуальних систем проектування, здатних самостійно оперувати категоріями точності та взаємозамінності.

Формулювання цілей статті. Мета статті полягає у теоретичному обґрунтуванні методики інтеграції параметричних допусків і посадок у тривимірне геометричне ядро САД-моделей. Дослідження спрямоване на вирішення проблеми відсутності зв'язку між аналітичними параметрами поверхонь та нормативними вимогами стандартів, що дозволить автоматизувати процес коригування геометрії виробу залежно від обраного ступеня точності. У контексті освітньої складової мета дослідження охоплює розробку методичних підходів до формування інженерних компетентностей у здобувачів освіти.



Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасна парадигма промислового виробництва базується на концепції безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу виробу, що вимагає докорінного перегляду ролі геометричної моделі в системі проектування. Перехід від традиційного документального супроводу до модельно-орієнтованого визначення (MBD) стає можливим лише за умови, що модель перестає бути просто візуальним образом і перетворюється на цифрове сховище технічної інформації. Як ґрунтовно зазначає Л. І. Нефьодов, «Створена один раз модель виробу використовується багаторазово. До неї вносяться доповнення і зміни, вона слугує відправною точкою у модернізації виробу. Модель виробу включає: геометричні дані, інформацію про конфігурацію виробу, дані про зміни, узгодження та затвердження» [3, с. 45]. У цьому контексті інтеграція параметричних допусків і посадок є критичним етапом, оскільки вона дозволяє пов'язати абстрактну геометрію з реальними фізичними обмеженнями виробничого процесу.

Процес формування «розумної» 3D-моделі починається з розробки математичного апарату, який дозволяє системі сприймати параметри точності як активні змінні. У своїй праці М. В. Донченко підкреслює методичну важливість такого підходу, вказуючи, що параметричне моделювання надає «Можливість отримувати відразу багато конфігурацій деталі, маючи одну концепт-модель і таблицю (базу даних) параметрів» [1, с. 54]. Це означає, що при призначенні допуску алгоритм повинен не просто генерувати графічний символ на екрані, а створювати асоціативний зв'язок між поверхнею деталі та відповідним записом у цифровій базі нормативів. Така інтеграція забезпечує динамічність моделі: зміна якості точності призводить до автоматичного перерахунку граничних розмірів, що є основою для подальшої автоматизації технологічних процесів.

Особливу складність при інтеграції допусків становить опис нелінійних та просторових поверхонь, де відхилення форми мають складний аналітичний



характер. Це добре продемонстровано у дослідженні Холодняка Ю. В., в якому вчений пропонує метод, що дозволяє формувати моделі функціональних поверхонь технічних виробів в САD-системах, зокрема, там зазначається що «З метою запобігання заклинювання ротора у процесі роботи компресора було змінено контур ротора. Вихідний контур, сформованого кола був замінений на обвід, що інтертерполує точковий ряд, вузли якого призначені за спеціально розробленим алгоритмом. Алгоритм заснований на визначенні взаємного розташування контуру корпусу та ротора у різні моменти роботи компресора» [2, с. 266]. Цей приклад наочно ілюструє необхідність параметризації не лише лінійних розмірів, а й самого геометричного каркаса моделі, де допуск визначає межі допустимих коливань кожної точки інтерполяції.

Алгоритм інтеграції, що пропонується в даній статті, базується на трирівневій структурі обробки даних. На першому рівні відбувається ідентифікація типу геометричного елемента та визначення його функціональної ролі в збірці. Як слушно зауважує О. О. Дереза, порівнюючи в своїй роботі класичний і параметричний спосіб побудови валів: «Кожен із підходів має свої переваги та недоліки й використовується залежно від кваліфікації конструктора, вимог до моделі та методики навчального процесу. Обидва методи дозволяють створити точну 3D-модель вала в Autodesk Inventor. Метод з генератором компонентів вала автоматизує багато кроків і включає інженерні розрахунки» [10, с. 23]. Тому така автоматизація з включенням інженерних розрахунків слугує вхідним сигналом для другого рівня алгоритму – звернення до цифрових стандартів взаємозамінності. На пріоритетності стандартизованого підходу наголошує у своїй роботі Р. М. Стрельчук, стверджуючи, що «Будь-яка система визначається рядом вихідних ознак. Найбільше наочно й повно їх можна розглянути на прикладі системи допусків і посадок гладких з'єднань (ДСТУ ISO 286–1–2002)» [11, с. 40]. Таким чином на другому рівні алгоритму



програма автоматично «витагує» значення верхнього та нижнього відхилень, перетворюючи літерні позначення посадок у цифрові масиви.

Третій рівень алгоритму полягає в автоматизованій перевірці моделі на збираність та відповідність принципам взаємозамінності. На важливості відповідності принципам взаємозамінності слушно наголошує в своїй роботі А. В. Кропивна тому що, саме завдяки відповідності цим принципам «встановлюються обов'язкові оптимальні якісні характеристики. Це створює передумови для спеціалізації та широкого впровадження автоматизації виробничих процесів» [12, с. 8]. На цьому етапі система проводить просторовий аналіз розмірних ланцюгів, враховуючи накопичення похибок. Якщо обрана посадка призводить до неможливості складання при поєднанні граничних значень, алгоритм сигналізує про помилку ще на етапі проектування, що неможливо при традиційному 2D-підході. Важливість такої глибокої інтеграції допусків проявляється не лише в проектуванні нових виробів, а й при вирішенні специфічних задач реінжинірингу та відновлення техніки. Впровадження параметричних допусків у 3D-модель відновленої деталі дозволяє автоматично генерувати траєкторії обробки, які гарантують задану якість поверхневого шару та дотримання посадок після ремонту.

Розвиток таких інтелектуальних систем моделювання також має значний вплив на підготовку майбутніх кваліфікованих фахівців. Узагальнення педагогічного досвіду за 2024 рік показує, що «вивчення графічних дисциплін і 3D-моделювання у ЗВО України, перш за все, має на меті розвиток у майбутніх фахівців здатностей до просторового, абстрактного і творчого мислення, а також набуття умінь та навичок 3D-моделювання та їх застосування для вирішення практичних інженерних проблем широкого спектру складності» [6, с. 870]. Отже здобувачі освіти, працюючи з параметричними моделями, вчаться сприймати деталь як комплекс взаємопов'язаних геометричних та технологічних параметрів.



Разом з цим, застосування описаного алгоритму дозволяє реалізувати концепцію наскрізного проектування, де кожна зміна в допусках миттєво відображається на всіх наступних етапах. Це створює умови для функціонування «цифрового двійника», який повністю імітує поведінку реального виробу під час виготовлення та експлуатації. Саме завдяки автоматизації вибору параметрів точності з баз даних ДСТУ та ISO, вдається мінімізувати ризик людської помилки. Водночас особливу увагу в контексті автоматизації проектування слід приділити галузевій специфіці. Зокрема розрахункам та моделюванню вузлів транспортних засобів, де точність з'єднань безпосередньо впливає на безпеку експлуатації. На даному аспекті акцентують увагу в своїй роботі науковці В. А. Косенко, С. В. Кадомський та В. В. Малишев зазначаючи, що «Підвищення вимог до точності розмірів та властивостей оброблюваних деталей призводить до необхідності підвищення вимог вимірювань та контролю. Щоб забезпечувати необхідну точність, доводиться, в свою чергу, підвищувати вимоги до точності устаткування і пристроїв, а також до стабільності застосованих технологічних процесів та матеріалів» [13, с. 7]. Тому алгоритм інтеграції в даному випадку слід доповнити модулем перевірки специфічних параметрів, характерних для рухомого складу, що дозволяє системі САД автоматично коригувати геометричні параметри моделі з урахуванням зносу та теплових розширень. Практична реалізація таких алгоритмів найефективніше здійснюється через використання спеціалізованих інструментів автоматизованого проектування. Як приклад одного з таких інструментів О. М. Артюх з співавторами наводять систему SolidWorks, зазначаючи що «SolidWorks дозволяє досить просто генерувати креслення створених у ньому деталей, вузлів і виробів. Креслення підтримують двосторонній асоціативний зв'язок із тривимірними моделями. При внесенні змін у модель її креслення автоматично модифікується відповідно



до них. І навпаки, якщо користувач змінює який-небудь розмір на кресленні, це відразу ж відбивається в тривимірній моделі» [15, с. 397].

Таким чином, інтеграція параметричних допусків і посадок у середовище 3D-моделювання є не просто технічним покращенням інтерфейсу САПР, а фундаментальним кроком до створення інтелектуальних систем виробництва, де якість та точність закладаються програмним шляхом на рівні математичного коду моделі. Це відкриває нові перспективи для розвитку нових технологій, де обмін даними між проектуванням, виготовленням на верстатах з ЧПК та контролем на координатно-вимірювальних машинах відбувається в межах єдиної, насиченої параметрами 3D-моделі.

Висновки. Узагальнюючи результати проведеного дослідження, можна констатувати, що поставлена мета щодо теоретичного обґрунтування та розробки методики інтеграції параметричних допусків у 3D-середовище була повністю досягнута. Проведений аналіз продемонстрував, що сучасний стан цифровізації машинобудування вимагає відмови від статичного представлення точності на користь інформаційних моделей, де допуск виступає активним параметром геометричного ядра. Наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму, який забезпечує динамічний зв'язок між аналітичним описом поверхонь та цифровими базами нормативних даних, що дозволяє автоматизувати процес прийняття конструкторських рішень.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується можливістю створення єдиного інформаційного простору на засадах MBD-концепції, де 3D-модель стає єдиним і достатнім джерелом даних для всіх етапів життєвого циклу виробу. Впровадження запропонованих підходів у середовищі сучасних САПР дозволяє суттєво знизити трудомісткість проектування та мінімізувати ймовірність виникнення суб'єктивних помилок при призначенні посадок. Особливу роль це відіграє в автомобілебудуванні та авіації, де точність з'єднань критично впливає на надійність технічних систем. Як приклад було



показано інтеграцію стандартів ISO та бібліотек в SolidWorks. Таким чином параметризація допусків дозволяє реалізувати наскрізний цикл від ескізу до автоматизованого метрологічного контролю, забезпечуючи повну взаємозамінність деталей без необхідності паперового супроводу.

У контексті освітньої складової дослідження доведено, що використання подібних методик у підготовці майбутніх фахівців сприяє формуванню якісно нових компетентностей у здобувачів освіти. Розуміння взаємозв'язку між геометричною формою та технологічними обмеженнями через інструменти 3D-моделювання підвищує рівень їхньої професійної адаптивності до реальних виробничих задач. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі вбачаються у розробці спеціалізованих плагінів для хмарних CAD-платформ, які дозволять здійснювати колективне проектування складних вузлів із автоматичним узгодженням розмірних ланцюгів у реальному часі.

Список використаних джерел

1. Донченко М. В. Технології комп'ютерного проектування : навч. посіб. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 364 с.
2. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розробка технології формування cad-моделей поверхонь технічних виробів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Мелітополь, 2022. Вип. 12, том 2. С. 259-268.
3. Нефьодов Л.І., Невлюдов І.Ш., Безкоровайний В.В. CALS-технології і системи : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2021. 272 с.
4. Бичков І. В., Лисоченко І. М., Бичков Н. І., Рябіков С. М., Селезньова Г. С. Формування елементів інформаційного простору для забезпечення механічної обробки деталей у авіабудуванні. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. Харків, 2025. № 105. С. 101-111.



5. Геращенко Я. М. Основи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів при матеріалізації 3D-моделей адитивними методами : автореф. дис. ... д-ра. тех. наук : 05.02.08. Київ, 2024. 42 с.
6. Стожок О.О., Козяр М.М., Товт Б. М. Використання 3D-модельовання у підготовці фахівців із механічної інженерії. *«Наука і техніка сьогодні» (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): журнал.* Київ, 2024. Випуск № 9(37). С. 855-877.
7. Холодняк Ю. Використання систем автоматизованого проектування при вивченні інженерних дисциплін. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : Матеріали III наук.-практ. інтернет-конференції, м. Запоріжжя, 30 вересня 2022 р. Запоріжжя, 2022. С. 386-390.
8. Мацулевич О., Гавриленко Є. Дослідження питань взаємозв'язку між двовимірними і тривимірними моделями поверхонь геометричних об'єктів. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : Матеріали III наук.-практ. інтернет-конференції, м. Запоріжжя, 30 вересня 2022 р. Запоріжжя, 2022. С. 130-135.
9. Райковська Г. О. Геометро-графічна підготовка в технічних закладах вищої освіти. *«Педагогічні науки»: збірник наукових праць.* Херсон, 2021. № 94. С. 158-165.
10. Дереза О. О., Водяницький І. О., Михайленко О. Ю. Сучасні методики комп'ютерного проектування вузлів і деталей машин : навч. посіб. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 277 с.
11. Стрельчук Р. М. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. 235 с.
12. Кропівна А. В., Бондаренко Г. С., Кропівний В. М. Стандартизація : навч. посіб. Кропивницьки : ЦНТУ, 2021. 307 с.



13. Косенко В. А., Кадомський С. В., Малишев В. В. Взаємозамінність, стандартизація, технічні вимірювання та сертифікація транспортних засобів : підручник. Київ : Університет «Україна», 2017. 292 с.

14. Горбенко О. В., Лапенко Г. О., Лапенко Т. Г. Метрологічне та технологічне забезпечення відповідності параметрів поверхневого шару при відновленні деталей машин. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кропивницький, 2025. Вип. 55, С. 140-148.

15. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В., Сосик А. Ю., Щербина А. В. Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 540 с.