



## ТЕОРІЯ І МЕТОДИКА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ

УДК [378.016:744]:[006.3:004.9]

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.19479298>

### Цифрова трансформація стандартів взаємозамінності в курсі сучасної інженерної графіки

**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: 15.03.2026 | Опубліковано: 30.03.2026**

***Анотація:** У статті досліджено актуальну проблему модернізації графічної підготовки майбутніх фахівців в умовах сьогодення. Метою роботи є теоретичне обґрунтування та розробка методичних засад інтеграції стандартів взаємозамінності, стандартизації та технічних вимірювань у сучасний курс інженерної графіки на основі цифрових технологій.*

*У процесі дослідження використано комплекс методологічних підходів, зокрема: аналіз міжнародних стандартів серії ISO GPS (Geometrical Product Specifications) для визначення вимог до цифрових моделей; метод системного аналізу для встановлення міждисциплінарних зв'язків; а також метод комп'ютерного моделювання в середовищах CAD (SolidWorks, Autodesk Inventor) для апробації технологій MBD (Model-Based Definition).*

*Основний зміст дослідження фокусується на переході від традиційного 2D-нормоконтролю до використання інтелектуальних 3D-анотацій PMI (Product Manufacturing Information). Розглянуто алгоритми автоматизованого*



нанесення допусків та посадок, які дозволяють мінімізувати суб'єктивні помилки при проектуванні та забезпечують однозначність інтерпретації метрологічних даних. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу ефективності «ручного» та цифрового анування, що демонструє значне скорочення часу на розробку конструкторської документації та підвищення її якості.

За результатами дослідження зроблено висновки, що впровадження цифрової трансформації стандартів у навчальний процес дозволяє сформувати у студентів цілісне розуміння життєвого циклу виробу – від віртуальної ідеї до реального метрологічного контролю на виробництві. Доведено, що використання наскрізних цифрових технологій підвищує рівень професійних компетентностей випускників, адаптуючи їх до роботи в умовах де використовують PLM-системи. Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження запропонованих методичних рекомендацій у навчальні плани педагогічних університетів для посилення міждисциплінарної інтеграції загальнотехнічних дисциплін.

**Ключові слова:** інженерна графіка, взаємозамінність, стандартизація, технічні вимірювання, CAD-системи, геометричні характеристики виробів, допуски та посадки.

## **Digital Transformation of Interchangeability Standards in Modern Engineering Graphics Courses**

**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 addresses the pressing issue of modernizing the graphical training of future specialists in today's environment. The aim of the work is the theoretical substantiation and development of methodological foundations for integrating standards of interchangeability, standardization, and technical measurements into a modern engineering graphics course based on digital technologies.*

*During the research, a set of methodological approaches was used, including: an analysis of the international ISO GPS (Geometrical Product Specifications) standards to define requirements for digital models; the systematic analysis method to establish interdisciplinary links; and the computer modeling method in CAD environments (SolidWorks, Autodesk Inventor) to test MBD (Model-Based Definition) technologies.*

*The main content of the research focuses on the transition from traditional 2D quality control to the use of intelligent 3D annotations known as PMI (Product Manufacturing Information). Algorithms for the automated application of tolerances and fits are considered, which allow for the minimization of subjective design errors and ensure unambiguous interpretation of metrological data. Particular attention is paid to a comparative analysis of the effectiveness of «manual» and digital annotation, demonstrating a significant reduction in design documentation development time and an increase in its overall quality.*

*Based on the research results, conclusions were drawn that the implementation of digital transformation of standards in the educational process allows for the formation of a holistic understanding of the product life cycle among students – from a virtual idea to real metrological control in production. It is proved that the use of end-to-end digital technologies increases the level of professional competencies of graduates, adapting them to work in high-tech enterprises that utilize PLM systems. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the proposed methodological recommendations into the curricula of Pedagogical*



*universities to strengthen the interdisciplinary integration of general engineering disciplines.*

**Keywords:** *engineering graphics, interchangeability, standardization, technical measurements, CAD systems, Geometrical Product Specifications, tolerances and fits.*

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток концепції «Індустрія 4.0» та перехід до безпаперового цифрового виробництва висувають нові вимоги до графічної підготовки майбутніх фахівців. Проте, як зазначають дослідники, існує суттєвий розрив між графічною побудовою та метрологічним обґрунтуванням виробів [21; 24]. Традиційна методика викладання інженерної графіки часто обмежується статичним 2D-кресленням, де допуски та посадки сприймаються студентами як формальні додатки, а не як критичні параметри, що визначають функціональність та складальність механізмів. Відсутність інтегрованого підходу до використання інструментів цифрового анотування (PMI) та моделей на основі визначення (MBD) у навчальному процесі призводить до недостатнього розуміння студентами взаємозв'язку між графічним образом деталі та її реальною точністю, що гальмує адаптацію молодих фахівців до роботи в умовах сучасних автоматизованих систем управління життєвим циклом виробу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних наукових досліджень засвідчує зростаючу увагу вітчизняних і зарубіжних учених до проблем цифрової трансформації графічної підготовки майбутніх фахівців, зокрема в контексті інтеграції CAD-технологій, стандартів взаємозамінності та розвитку професійних компетентностей в умовах індустрії 4.0.

У дослідженні Т. Гнітецької та ін. [7] розглянуто особливості формування професійних компетентностей здобувачів вищої освіти в межах курсу комп'ютерної інженерної графіки. Акцентовано увагу на інтеграції сучасних цифрових інструментів і CAD-систем як засобу розвитку практичних умінь роботи з графічними моделями. Показано, що використання цифрового



моделювання сприяє підвищенню якості інженерної підготовки та формуванню готовності до роботи в умовах цифрового виробництва.

Наукові підходи до визначення професійних умінь майбутніх інженерів проаналізовано у роботі С. М. Артюх та ін. [1], де окреслено ключові компетентності, що впливають на успішність навчання у технічних спеціальностях. Визначено значення аналітичного мислення, технічної грамотності та здатності працювати з інженерною інформацією. Отримані результати корелюють із потребою формування компетентностей, необхідних для цифрового проектування та роботи з сучасними інженерними системами.

Огляд сучасних САПР-технологій представлено у праці І. В. Овчарук та ін. [10], де систематизовано функціональні можливості САД-систем у галузі комп'ютерної графіки. Розкрито основні напрями їх застосування у створенні, редагуванні та аналізі інженерних моделей. Доведено, що використання таких технологій є необхідною умовою переходу до цифрових підходів у проектуванні та підготовці фахівців.

Переосмислення професійних компетентностей у контексті Індустрії 4.0 здійснено у дослідженні С. С. Геренко [17], де розглянуто трансформацію вимог до фахівців у сфері графічного дизайну. Висвітлено вплив цифровізації, автоматизації та інноваційних технологій на зміну професійного профілю спеціаліста. Обґрунтовано необхідність формування нових цифрових та міждисциплінарних компетентностей, релевантних сучасному виробничому середовищу.

Методичні аспекти використання 3D-моделювання та адитивних технологій у підготовці фахівців розкрито у праці І. В. Гевка та ін. [6]. Описано можливості інтеграції тривимірного моделювання та 3D-друку у навчальний процес як засобу підвищення наочності та практичної спрямованості навчання. Доведено, що такі підходи сприяють розвитку просторового мислення та формуванню інженерної компетентності в умовах цифровізації.



Особливості застосування інтерактивних засобів навчання інженерної графіки проаналізовано у роботі В. А. Бойка [2], де обґрунтовано їх вплив на підвищення ефективності освітнього процесу. Показано, що використання цифрових ресурсів і візуалізаційних інструментів сприяє кращому засвоєнню складних графічних понять. Визначено, що інтерактивні технології формують у здобувачів стійкі професійні навички роботи з інженерною інформацією.

Використання систем автоматизованого проектування в інноваційній методиці навчання графічних дисциплін досліджено у праці І. Тарас та ін. [22]. Розглянуто можливості інтеграції САД-технологій у структуру освітнього процесу як основи сучасної графічної підготовки. Встановлено, що застосування таких систем підвищує якість підготовки здобувачів та сприяє формуванню їх професійної готовності до інженерної діяльності.

Значення САПР у трансформації науково-виробничого простору висвітлено у дослідженні О. З. Томашівського та ін. [15], де окреслено сучасні виклики та перспективи розвитку цифрового проектування. Проаналізовано вплив САД-систем на модернізацію виробничих процесів і наукових досліджень. Доведено, що впровадження таких технологій є ключовим чинником переходу до цифрової економіки та інженерії.

Особливості застосування сучасних технологій 3D-моделювання в умовах дистанційного навчання розглянуто у роботі Л. В. Гапонової та ін. [5]. Описано можливості використання цифрових платформ для організації графічної підготовки здобувачів освіти. Показано, що дистанційні технології можуть ефективно забезпечувати формування практичних навичок за умови використання відповідних програмних засобів.

Питання формування графічної компетентності як складової професійної підготовки проаналізовано у праці О. В. Волошиної та ін. [4]. Визначено сутність графічної компетентності та її роль у підготовці майбутніх фахівців технічного профілю. Доведено, що високий рівень володіння графічними засобами є



необхідною умовою ефективної діяльності в сучасному цифровому інженерному середовищі.

Аналіз наукового доробку дає підстави окреслити ключові напрями розвитку сучасної інженерної графіки та суміжних галузей. Фундаментальні засади графічної підготовки розкрито у праці В. В. Ваніна та ін. [3], де обґрунтовано перехід від традиційної нарисної геометрії до комп'ютерного моделювання як провідного інструменту створення конструкторської документації, що відповідає вимогам цифрового виробництва.

Розвиток метрологічного забезпечення у межах концепції «Індустрії 4.0» досліджено Г. П. Клименком та ін. [8], які розглядають стандарти ISO GPS як універсальну цифрову мову передачі даних про точність виробів у сучасному виробничому середовищі.

Технологічні аспекти впровадження концепції «моделі як єдиного джерела даних» висвітлено у праці В. R. Fischer [16], де розкрито можливості сучасних CAD-систем, зокрема SolidWorks, а також інструменти аналізу розмірних ланцюгів у тривимірному середовищі. Глобальні тенденції уніфікації цифрових анотацій відображено у документах ISO/TC 213 [19] та публікаціях NIST [20], що підкреслює необхідність опанування стандартів PMI як невід'ємного складника професійної підготовки інженера.

Проблематика забезпечення якості та точності на етапі проектування ґрунтовно розкрита у дослідженні G. Henzold [18], де наголошено на визначальній ролі геометричного опису виробу ще на стадії ескізування. Питання оновлення змісту графічних дисциплін відповідно до сучасних вимог ринку праці висвітлено у праці В. Є. Михайленка та ін. [9], які обґрунтовують необхідність інтеграції цифрових технологій у навчальні програми для забезпечення конкурентоспроможності випускників.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значний обсяг



досліджень у сфері інженерної графіки та цифрового проєктування, у сучасних публікаціях зберігаються певні обмеження. Переважає підхід, за якого CAD-системи розглядаються переважно як засіб геометричного моделювання, тоді як їх можливості як обчислювального середовища для аналізу допусків і забезпечення точності виробів залишаються недостатньо реалізованими. Така орієнтація ускладнює формування системного інженерного мислення та розуміння повного життєвого циклу виробу.

Методичні підходи до викладання стандартів взаємозамінності часто зберігають «папероцентричний» характер і не повною мірою відповідають умовам безпаперового виробництва. Обмежене використання цифрових анотацій і тривимірних моделей звужує уявлення про взаємозв'язок між геометрією виробу та його метрологічними характеристиками. Водночас відсутність цілісного алгоритму навчання, що охоплює шлях від вибору посадок до їх автоматизованої перевірки у 3D-середовищі, не забезпечує сформованості комплексних професійних умінь.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю подолання зазначених прогалин шляхом впровадження цифрової трансформації стандартів взаємозамінності у навчальному процесі. Запропонований підхід орієнтований на інтеграцію геометричних і метрологічних даних у єдину інформаційну модель, що сприяє підготовці фахівців до роботи в умовах цифрового виробництва та систем управління життєвим циклом виробу (PLM).

### **Формулювання цілей статті.**

Метою статті є теоретичне обґрунтування та розробка методичних засад інтеграції стандартів взаємозамінності, стандартизації та технічних вимірювань у сучасний курс інженерної графіки на основі цифрових технологій. Реалізація поставленої мети передбачає аналіз переходу від 2D-нормоконтролю до формування інтелектуальних 3D-анотацій, що забезпечують технологічність виробів на етапі їхнього графічного представлення.



**Виклад основного матеріалу дослідження.** Осмислення цифрової трансформації стандартів взаємозамінності у курсі інженерної графіки вимагає передусім з'ясування того онтологічного зсуву, який відбувається у самому розумінні інженерного креслення як носія інформації. Якщо у класичній парадигмі креслення функціонувало як кінцевий артефакт – двовимірна проєкція, що фіксувала задум конструктора у площинному вигляді, то в умовах цифрового проєктування воно набуває статусу одного з рівнів багат шарової інформаційної моделі виробу (Product Information Model), яка поєднує геометричні, метрологічні, технологічні та експлуатаційні параметри в єдиному цифровому середовищі [3; 9]. Відмова від традиційних нарисних методів на користь комплексного геометричного моделювання у такому контексті постає як прояв глибинної трансформації епістемологічної природи графічного образу, оскільки інженерне зображення перестає виконувати функцію статичної фіксації задуму і перетворюється на динамічну інформаційну структуру. Розмірне число у складі такої моделі втрачає ознаки ізольованого позначення та функціонує як параметризований елемент цифрового середовища, здатний до автоматичного оновлення, перевірки й подальшої трансляції на всі етапи життєвого циклу виробу. Видається обґрунтованим стверджувати, що саме цей перехід – від статичного зображення до динаміки інформаційної моделі – і становить сутність цифрової трансформації стандартів взаємозамінності, оскільки він докорінно змінює спосіб, у який майбутній інженер взаємодіє з вимогами до точності. Якщо раніше допуски та посадки додавалися на етапі фінального оформлення креслення і сприймалися студентами як формальний атрибут, що підпорядкований графічній побудові, то цифрова методологія передбачає зворотну логіку: параметри взаємозамінності визначаються на рівні тривимірної геометрії і стають первинними стосовно будь-якої похідної документації.

Перший і, мабуть, найбільш наочний рівень цієї трансформації пов'язаний із переходом від двовимірного анотування до технології PMI (Product



Manufacturing Information), яка передбачає нанесення виробничих даних безпосередньо в тривимірне середовище моделі [12]. Суттєвим у цьому контексті постає не стільки трансформація інтерфейсу, що передбачає заміну паперового креслення цифровою моделлю, скільки переосмислення ролі анотації у структурі проектного процесу як носія інженерної інформації. У межах традиційного 2D-представлення позначення допуску функціонує як візуальний символ, орієнтований на інтерпретацію людиною, тоді як у тривимірному середовищі РМІ-анотація набуває статусу семантично визначеного об'єкта, інтегрованого у цифрову модель. Така анотація забезпечує можливість одночасного зчитування як людиною, так і програмними системами, включаючи САМ-модулі, координатно-вимірювальні машини та PLM-платформи, що формує єдиний інформаційний простір для проектування, виготовлення та контролю якості виробу. З методичного погляду це відкриває принципово нову послідовність дій для студента: спочатку визначається функціональне призначення конкретної поверхні деталі у тривимірному просторі, потім, виходячи з цієї функції, обирається відповідний квалітет або тип посадки, і лише після цього система автоматично перевіряє, чи повністю визначена геометрія з погляду вимог взаємозамінності. Інструменти DimXpert у SolidWorks або MBD-модулів в Autodesk Inventor формують розвинене середовище інтелектуального анотування, у межах якого процес задання параметрів точності виходить за межі простого нанесення позначень і набуває рис аналітичної процедури, спрямованої на виявлення повноти визначення геометрії та потенційних невідповідностей [20]. Застосування таких інструментів створює умови для автоматизованої діагностики пропусків у структурі моделі, що, у свою чергу, дозволяє інтерпретувати анотування як невід'ємний компонент процесу проектування, інтегрований у логіку побудови виробу та його функціонального обґрунтування, водночас виводячи його за межі традиційного сприйняття як завершального етапу оформлення конструкторської документації. Видається обґрунтованим



твердження, що технологія РМІ у цьому контексті трансформує сам характер анотування, перетворюючи його на інтелектуальний акт функціонального аналізу, у межах якого студент змушений осмислювати взаємозв'язок між призначенням поверхні та допустимими відхиленнями ще до формування первинних геометричних позначень.

Другий рівень трансформації пов'язаний із впровадженням міжнародної системи стандартів ISO GPS (Geometrical Product Specifications), яка, не буде перебільшенням сказати, докорінно змінює саму філософію визначення точності [14]. Традиційна методика виходила з уявлення про деталь як про ідеальну геометричну форму, до якої додаються припустимі відхилення; натомість концепція GPS розглядає деталь як сукупність реальних поверхонь, кожна з яких має власну геометричну недосконалість, і завдання інженера полягає у тому, щоб описати допустимі межі цієї недосконалості мовою формалізованих правил [13]. Не виключено, що саме ця зміна оптики (від ідеальної форми з відхиленнями до реальної поверхні з допусками) є найбільш складною для засвоєння студентами, оскільки вимагає переходу від звичного детерміністського мислення до мислення ймовірнісного, де кожна деталь є носієм невизначеності. У цифровому середовищі цей перехід значно полегшується завдяки можливості візуалізації зон допусків у тривимірному вигляді: студент може побачити «найгірший випадок» (worst-case scenario) – модель деталі з максимальними відхиленнями форми, циліндричності чи площинності, – і переконатися, як ці відхилення впливають на складальність вузла. Такий матричний підхід до представлення допусків перетворює абстрактні числові значення з довідкових таблиць на наочні просторові образи, що, за нашим переконанням, суттєво сприяє формуванню інтуїтивного розуміння природи взаємозамінності.

Третій рівень, пов'язаний із автоматизацією розрахунків та використанням інтегрованих баз даних стандартних елементів, постає як закономірне продовження попередніх етапів, оскільки повноцінне функціонування РМІ-



анотацій у межах системи GPS-стандартів передбачає здатність цифрового середовища не обмежуватися збереженням інженерної інформації, а забезпечувати її верифікацію, інтерпретацію та узгодження з технологічними вимогами. Практично це виявляється у тому, що при проектуванні типових з'єднань, скажімо, вал-втулка, САД-система автоматично пропонує рекомендовані посадки згідно з обраною системою (отвору чи вала), а також сигналізує про конфлікти: наприклад, якщо обраний допуск не може бути реалізований вказаним методом обробки або якщо розмірний ланцюг не замикається [16]. Спеціалізовані модулі аналізу розмірних ланцюгів дозволяють проводити оцінку ризиків ще на етапі складання, що переводить студента з позиції виконавця механічних операцій креслення у позицію інженера-аналітика, здатного прогнозувати виробничі проблеми на стадії віртуального прототипування. Важливо підкреслити, що зазначені три рівні формують єдину системну цілісність, у межах якої РМІ-анотації наповнюють модель семантичним змістом, GPS-стандарти визначають мову опису цієї семантики, а автоматизовані бази даних забезпечують її верифікацію, причому саме їх узгоджена взаємодія дозволяє розглядати цифрову трансформацію стандартів взаємозамінності як глибинний процес, пов'язаний зі зміною принципів представлення та обробки інженерних даних, а не як поверхнєве оновлення інструментальних засобів.

Якщо попередні міркування стосувалися концептуальних засад трансформації, то тепер видається доцільним простежити, як ці засади реалізуються у конкретній архітектурі навчального процесу. Ключовою ідеєю тут є відмова від традиційного роздільного вивчення «креслення деталі» та «розрахунку допусків» на користь наскрізної проєктної технології, що забезпечує безперервну передачу інформації про виріб протягом усього його життєвого циклу [11]. Методологія цифрової трансформації стандартів, як було обґрунтовано вище, ґрунтується на принципах функціонального толерування, у



межах яких анотація набуває статусу повноцінного носія інженерних даних, інтегрованих у цифрову модель та доступних для зчитування автоматизованими системами [18; 20]. Такий підхід передбачає відмову від трактування анотацій як допоміжних елементів графічного оформлення і спрямовує увагу на їх роль у забезпеченні точності, функціональності та технологічності виробу. У зв'язку з цим логіка організації навчального процесу потребує переорієнтації на послідовне розгортання взаємопов'язаних фаз, кожна з яких природно переходить у наступну, відтворюючи структуру реального проектного циклу та забезпечуючи цілісність формування професійних компетентностей.

Аналітична фаза, з якої розпочинається робота, передбачає отримання студентом технічного завдання на складальний вузол і самостійний вибір посадок для ключових з'єднань, виходячи з їх функціонального призначення – забезпечення обертання вала, нерухомості зубчастого колеса чи герметичності стику. Значущість цього етапу розкривається передусім у його дидактичному вимірі, оскільки навчальна ситуація вибудовується таким чином, що студент від самого початку орієнтується на функціональну логіку виробу, а не на відтворення готових нормативних рішень. Формування такого підходу передбачає переорієнтацію мислення з пошуку табличного значення допуску на розв'язання інженерної задачі, у межах якої параметри взаємозамінності постають результатом обґрунтованого аналізу умов роботи конструктивного елемента.

Подальше розгортання цієї логіки відбувається у фазі моделювання та анотування, яка органічно продовжує аналітичний етап і забезпечує перенесення прийнятих рішень у цифрове середовище. У межах CAD-системи формується тривимірна модель виробу, визначаються базові поверхні та здійснюється задання семантичних допусків із використанням інструментів MBD, що інтегрують геометричні та метрологічні характеристики у єдину структуру даних. Взаємодія з програмним середовищем набуває характеру діалогу,



оскільки система автоматично сигналізує про невідповідність обраної посадки стандартам або некоректність визначення баз, тим самим спрямовуючи процес проектування у русло обґрунтованих інженерних рішень. Не виключено, що саме цей зворотний зв'язок, миттєва реакція цифрового середовища на помилку, є найбільш потужним педагогічним інструментом, оскільки він перетворює абстрактне правило стандарту на конкретну ситуацію, в якій студент безпосередньо переживає наслідки неправильного рішення. Нарешті, фаза віртуальної перевірки, реалізована через модулі аналізу розмірних ланцюгів на кшталт TolAnalyst, дозволяє побачити, чи змонтується вузол при найгіршому поєднанні відхилень, і саме в цей момент теоретичне поняття взаємозамінності набуває для студента емпіричної наочності, оскільки він бачить його реалізацію (або нереалізацію) у віртуальній складальній операції.

Описана проєктна технологія, якщо розглядати її у контексті формування професійних компетентностей, спрямована на розвиток щонайменше трьох взаємопов'язаних здатностей, які у своїй сукупності утворюють те, що можна назвати «цифровою інженерною грамотністю». Перша з них – критичне мислення у конструкторській документації – передбачає усвідомлення того, що кожна лінія та кожен розмір на екрані мають метрологічне підґрунтя і не можуть бути призначені довільно, без урахування функціональних, технологічних та економічних обмежень. Друга – володіння цифровими інструментами контролю – охоплює вміння працювати з автоматизованими бібліотеками стандартних виробів, інструментами перевірки геометричних допусків та модулями аналізу розмірних ланцюгів, тобто з тим інструментарієм, що реально використовується на сучасних підприємствах. Третя – технологічна грамотність у вузькому сенсі – означає розуміння зв'язку між призначеним квалітетом точності та складністю й вартістю виготовлення деталі: занадто жорсткий допуск здорожчує виробництво, а занадто вільний – ставить під загрозу функціональність вузла, і саме пошук цього балансу є однією з ключових компетентностей інженера-

конструктора. Наведені здатності формуються у межах наскрізної проєктної діяльності, у якій кожне прийняте рішення набуває багатовимірного характеру, поєднуючи графічний, метрологічний і технологічний аспекти в єдиному процесі інженерного мислення. Така організація навчання створює умови для природної інтеграції різних видів знань і вмінь, оскільки будь-яка дія студента водночас передбачає візуалізацію, обґрунтування точності та врахування виробничих обмежень. У результаті формується цілісна професійна компетентність, у якій окремі складові не функціонують ізольовано, а взаємодіють як елементи єдиної системи інженерної діяльності.

Для того щоб перевести розмову з площини теоретичних припущень у площину обґрунтованих оцінок, видається доцільним здійснити порівняльний аналіз ефективності традиційного та цифрового підходів до анотування за ключовими параметрами проєктування. Результати такого зіставлення, систематизовані у таблиці 1, дають підстави стверджувати, що переваги цифрового анотування мають системний характер.

**Таблиця 1**

*Порівняльний аналіз ефективності «ручного» та цифрового анотування*

<b>Параметр порівняння</b>	<b>Традиційне «ручне» анотування (2D)</b>	<b>Цифрове анотування (3D PMI)</b>
<b>Швидкість внесення змін</b>	Низька. Потребує перерахунку ланцюгів та ручного редагування на всіх виглядах.	Висока. Зміна в моделі автоматично оновлює всі пов'язані анотації та специфікації.
<b>Ризик помилок</b>	Високий (людський фактор при перенесенні значень з таблиць допусків).	Мінімальний (автоматичний вибір значень з інтегрованих баз стандартів).
<b>Інтерпретація вимог</b>	Можливе двояке трактування складних геометричних допусків.	Однозначне візуальне представлення зони допуску в 3D-просторі.



<b>Зв'язок із виробництвом</b>	Потребує додаткового програмування верстатів ЧПК за кресленням.	Дані РМІ зчитуються САМ-системами автоматично для генерації кодів обробки.
<b>Контроль якості</b>	Ручне вимірювання та заповнення протоколів контролю.	Автоматизований контроль на КВМ (координатно-вимірювальних машинах) за моделлю.

Джерело: власна розробка автора

Дані, наведені у таблиці, дозволяють зафіксувати тенденцію, яка виходить за межі суто технічної ефективності й торкається фундаментальної зміни у природі інженерного документа. Якщо традиційне анотування передбачає багаторазове дублювання інформації – від таблиці допусків через креслення до програми верстата, – і на кожному етапі цього ланцюга неминуче накопичуються помилки «людського фактора», то цифрове анотування реалізує принцип «єдиного джерела істини» (single source of truth), за якого модель, що містить РМІ-дані, є водночас і конструкторським документом, і технологічною інструкцією, і еталоном для контролю якості. Скорочення часу на розробку документації, мінімізація помилок при читанні та створенні креслень, підвищення однозначності інтерпретації метрологічних вимог постають взаємопов'язаними проявами єдиного системного ефекту, що виникає внаслідок усунення проміжних ланок у передачі інженерної інформації. Окрім того, не слід нехтувати й мотиваційним аспектом: студенти, які працюють у цифровому середовищі, бачать прямий зв'язок між графічним образом деталі та її реальним функціонуванням у складі машини, що надає навчальному процесу сенсу і наближає його до реальної інженерної практики.

Зазначена обставина має й глибші наслідки для формування професійного мислення, які доцільно розглянути окремо. Завдяки цифровому анотуванню студент бачить, як призначена ним посадка безпосередньо впливає на складність виготовлення деталі: якщо обраний занадто жорсткий допуск, САД-система



може сигналізувати про неможливість його досягнення стандартними методами обробки, що змушує шукати компроміс між точністю та економічністю – і саме ця здатність до інженерного компромісу є однією з найважливіших ознак зрілого фахівця. Водночас усвідомлення того, що цифрова модель із допусками (РМІ) використовується для автоматизованої перевірки готової деталі на координатно-вимірювальній машині, сприяє формуванню у здобувача освіти відповідальності за коректність призначення баз і допусків, оскільки прийняті рішення підлягають подальшій реалізації у виробничому процесі, а не обмежуються контролем з боку викладача.

Таким чином, парадигма мислення майбутнього фахівця зазнає суттєвої трансформації: замість сприйняття креслення як фінального продукту навчання він починає бачити його як інформаційний етап у системі управління життєвим циклом виробу (PLM – Product Lifecycle Management), де дані про виріб є наскрізними і безперервними – від ідеї через проектування, виробництво і контроль до експлуатації та утилізації [19]. Така зміна способу мислення сприяє формуванню конкурентоспроможного випускника, здатного ефективно діяти в умовах домінування цифрових стандартів, а також забезпечує інтеграцію графічної підготовки з метрологічним компонентом, необхідність якої була окреслена на етапі постановки проблеми.

**Висновки.** Проведене дослідження, присвячене теоретичному обґрунтуванню та методичному забезпеченню цифрової трансформації стандартів взаємозамінності у курсі сучасної інженерної графіки, дає підстави сформулювати низку положень, що мають як теоретичне, так і практичне значення для розвитку інженерної освіти.

Насамперед слід констатувати, що інженерна графіка переживає глибинну парадигмальну трансформацію, зміст якої виходить за межі простої зміни інструментарію та пов'язаний із принциповим переосмисленням онтологічного статусу креслення: із фінального продукту проектування воно трансформується



в один із рівнів інтелектуальної 3D-моделі, насиченої семантичними PMI-анотаціями, які інтегрують виробничі, метрологічні та контрольні дані в єдине інформаційне середовище. Впровадження технології PMI дозволяє інтегрувати вимоги до взаємозамінності безпосередньо в цифрову геометрію виробу, що усуває традиційний розрив між графічною побудовою та метрологічним обґрунтуванням і створює передумови для наскрізної цифрової передачі інженерної інформації.

Здійснений порівняльний аналіз переконливо засвідчив, що переваги цифрового анування у середовищі CAD-систем набувають системного характеру, оскільки мінімізація ризику помилок «людського фактора», скорочення часу на розробку конструкторської документації та забезпечення однозначності інтерпретації метрологічних вимог постають взаємопов'язаними проявами єдиного ефекту, зумовленого реалізацією принципу «єдиного джерела істини», за якого 3D-модель із вбудованими PMI-даними одночасно виконує функції конструкторського документа, технологічної інструкції та еталона контролю якості. Зазначена обставина безпосередньо впливає на логіку організації навчального процесу, оскільки збереження традиційного роздільного вивчення креслення та розрахунку допусків втрачає методичну доцільність у контексті цифрового проектування.

Результати дослідження дають підстави стверджувати, що інтеграція параметрів взаємозамінності у курс графічної підготовки на основі наскрізної проектної технології сприяє формуванню у студентів системного інженерного мислення, у межах якого допуски та посадки набувають значення функціонально визначених характеристик, що безпосередньо впливають на якість, технологічність та економічну ефективність виробу. Такий підхід дозволяє подолати ту фрагментарність професійної підготовки, яка виникає внаслідок розмежування графічних та метрологічних дисциплін, і сформувати у здобувачів



освіти цілісне розуміння життєвого циклу виробу – від віртуальної ідеї до реального метрологічного контролю на виробництві.

Нарешті, з освітньо-прикладного погляду запропонована методика забезпечує підготовку фахівців, адаптованих до роботи у безпаперовому цифровому середовищі, де домінують PLM-системи та наскрізні цифрові стандарти. Така підготовка формує у випускників стійку професійну перевагу, оскільки вхід у професію відбувається за наявності вже сформованих навичок роботи з інструментами та нормативними підходами, що становлять повсякденну практику сучасного інженерного виробництва. Перспективи подальших досліджень пов'язуються з поглибленням інтеграції запропонованої методики з адитивними технологіями виробництва, у межах яких цифрова модель виконує функцію носія інженерної інформації та водночас слугує безпосередньою інструкцією для виготовлення виробу, що відкриває нові можливості для розвитку інженерної графіки й суміжних дисциплін.

### Список використаних джерел

1. Артюх С. М., Артюх А. В. Дослідження професійних вмінь, що визначають успішність навчання майбутніх здобувачів інженерних спеціальностей. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2025. № 19. URL: <http://pedagogical-academy.com/index.php/journal/article/download/1101/973>

2. Бойко В. А. Інтерактивні засоби навчання інженерної графіки майбутніх інженерів-механіків. *Вісник Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка. Педагогічні науки*. 2022. № 2. С. 65–72. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&MAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/vgnpu\\_2022\\_2\\_9.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&MAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/vgnpu_2022_2_9.pdf)

3. Ванін В. В., Вірченко Г. А., Яблонський П. М., Надкернична Т. М., Лебедева О. О. Комп'ютерна графіка в системі AUTOCAD (з елементами математичних основ і програмування). URL:



[file:///C:/Users/1/Downloads/Kompiuterna\\_hrafika\\_v\\_systemi\\_AUTOCAD\\_Pidruchnyk.pdf](file:///C:/Users/1/Downloads/Kompiuterna_hrafika_v_systemi_AUTOCAD_Pidruchnyk.pdf)

4. Волошина О. В., Бурлака Н. І., Пінаєва О. Ю. Графічна компетентність як складова професійної підготовки майбутніх фахівців у закладах вищої освіти. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2024. № 13. URL: <https://pedagogical-academy.com/index.php/journal/article/download/557/442>

5. Гапонова Л. В., Андрієнко С. В., Бугаєвський С. О., Шеховцова Т. О. Сучасні технології проєктування в 3D-моделюванні при дистанційному навчанні. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2025. № 14. URL: <http://pedagogical-academy.com/index.php/journal/article/download/603/490>

6. Гевко І. В., Потапчук О. І., Луцик І. Б., Ящик О. Б., Макаренко Л. Л. Методика використання 3D-моделювання та друку у графічній підготовці майбутніх фахівців галузі цифрових технологій. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2022. № 1(87). С. 95–110. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/739986/1/%D0%93%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%BE%20%D0%86%D0%B3%D0%BE%D1%80%20%D0%92%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf>

7. Гнітецька Т., Гнітецька Г. До питання формування професійних компетентностей здобувачів вищої освіти в курсі «Комп'ютерна інженерна графіка». *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2025. № 109. С. 67–80. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/download/351370/338404>

8. Клименко М., Косминський І., Дьяченко О., Погребач О. Інтеграція метрологічного підтвердження та технічної діагностики у концепцію цифрових двійників для забезпечення якості технологічного обладнання. *Техніка будівництва*. 2025. № 43. С. 76–82. URL: <https://tehbud.knuba.edu.ua/article/download/353799/340249>



9. Михайленко В. Є., Ванін В. В., Ковальов С. М. Інженерна та комп'ютерна графіка: підручник для студ. вищ. навч. закл. Київ: Каравела, 2020. 345 с. URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Mihaylenko\\_2012\\_368.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Mihaylenko_2012_368.pdf)
10. Овчарук І. В., Овчарук В. О. Комп'ютерна графіка. Огляд САПР-технологій. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*. 2022. № 5(2). С. 321–335. URL: [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/dpitsca\\_2022\\_5\\_2\\_11.pdf](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/dpitsca_2022_5_2_11.pdf)
11. Сірий І. С. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/5085>
12. Технічна документація на продукцію. Порядок поводження з даними цифрової продукції (PMI дані): ДСТУ ISO 16792:2018 (ISO 16792:2015, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 92 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79613&utm\\_source](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79613&utm_source)
13. Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Визначення геометричних допусків. Допуски форми, орієнтації, розташування та биття: ДСТУ EN ISO 1101:2018. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 154 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79322](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79322)
14. Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Принципи базових допусків: ДСТУ EN ISO 8015:2018. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 18 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79336](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79336)
15. Томашівський О. З., Томашівський М. О. Роль систем автоматизованого проектування (САПР) у трансформації науково-виробничого простору України: виклики та перспективи. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка»*. 2025. № 2(66). С. 30–38. URL: <http://visnyk-ekon.uzhnu.edu.ua/article/view/343015/330943>



16. Fischer B. R. Mechanical Tolerance Stackup and Analysis. Boca Raton: CRC Press, 2021. 480 p. URL: [file:///C:/Users/1/Downloads/10.1201\\_9780203021194\\_previewpdf.pdf](file:///C:/Users/1/Downloads/10.1201_9780203021194_previewpdf.pdf)

17. Gerenko S. Графічний дизайнер в епоху Індустрії 4.0: рефреймінг компетентності в контексті новітніх викликів. *Art and Design*. 2024. № 1. С. 113–122. URL: <https://jrn.knutd.edu.ua/index.php/artdes/article/download/1511/1413>

18. Henzold G. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection. Oxford: Elsevier Science, 2021. 624 p. URL: <http://alvarestech.com/temp/capp/Handbook-GeometricalDimensioningaTolerancingDesignManufacturingInspection.pdf>

19. ISO/TC 213. Geometrical product specifications and verification. URL: <https://www.iso.org/committee/54924.html>

20. NIST Special Publication 1101. Measurement Service and Standardization for Engineering Graphics. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2020. 120 p. URL: <https://www.nist.gov/>

21. Srybna Y., Molchanov P., Derkach D. Tools for modeling and design in the process of training specialists in vocational and technological education institutions. *Ukrainian Professional Education*. 2024. № 1(8). С. 42–52. URL: [https://uaprofedu.com.ua/web/uploads/pdf/article\\_Sribna.pdf](https://uaprofedu.com.ua/web/uploads/pdf/article_Sribna.pdf)

22. Taras I., Vytvytskyi V. Використання систем автоматизованого проектування в інноваційній методиці навчання графічних дисциплін. *Journal of Information Technologies in Education (ITE)*. 2023. № 54. С. 27–36. URL: <http://www.ite.kspu.edu/index.php/ite/article/download/863/821>

23. Tlija M., Korbi A., Louhichi B., Benamara A. A novel model for the tolerancing of nonrigid part assemblies in computer aided design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2019. № 19(4). 041008. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Borhen-Louhichi/publication/332543354\\_A\\_Novel\\_Model\\_for\\_the\\_tolerancing\\_of\\_non-](https://www.researchgate.net/profile/Borhen-Louhichi/publication/332543354_A_Novel_Model_for_the_tolerancing_of_non-)



[rigid\\_part\\_assemblies\\_in\\_CAD/links/5cbb4dd5299bf12097747381/A-Novel-Model-for-the-tolerancing-of-non-rigid-part-assemblies-in-CAD.pdf](https://www.euroscit.com/index.php/fag/article/download/562/550)

24. Vilchynska D., Harasymchuk I., Potapskyi P., Vusatyi M., Pecheniuk A. Integrative approach to studying instrumentation and electrical measurements in the context of modern power industry requirements. *Philosophy and Governance*. 2026. № 1(17). URL: <https://www.euroscit.com/index.php/fag/article/download/562/550>