



М. Т. Хомин, О. Л. Сторожук

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

МЕТОД СТРУКТУРИЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРЕСЛЕННЯ ДЛЯ CAD/CAM-СИСТЕМ

Досліджено метод структуризації геометричних елементів креслення для CAD/CAM-систем, що передбачає їх розпізнавання, індексацію та трансформацію у стандартизовані геометричні структури для подальшого їх автоматизованого оброблення. Цей підхід є невід'ємним етапом розвитку цифрових технологій проєктування у машинобудуванні, будівництві, дизайні, меблевій галузі та суміжних галузях, де точність геометрії й ефективність передачі технічної інформації визначають якість безпосереднього виробу. Показано, що використання структурованих геометричних елементів дає змогу забезпечити уніфікацію технічної документації, мінімізувати кількість виконання ручних операцій, цим самим підвищити точність і знизити вплив людського фактора у процесі проєктування та виготовлення остаточних деталей. Розглянуто основні алгоритми удосконалення геометричних елементів креслення: впорядкування геометричних фігур за сумісністю граничних точок, коригування координат із використанням опорної точки, формування замкнутих та незамкнутих контурів, а також зменшення відстаней між елементами для підвищення ефективності роботи обладнання на підставі числового програмного керування. Особливу увагу приділено визначенню віртуального початку координат креслення, нормалізації розміщення геометричних об'єктів у структурованому геометричному поданні та виявленню повторюваних структур, що дає змогу створити індексовані геометричні структури. Обґрунтовано можливість використання штучного інтелекту для автоматичного генерування креслень і параметризації геометричних фігур. Розкрито переваги впровадження повторюваних структур геометричних елементів у середовища CAD/CAM, зокрема – покращення адаптації креслень до змін технологічних процесів, інтеграцію з цифровими двійниками об'єктів, а також можливість повторного використання креслень із гнучким налаштуванням. Запропоновано підхід до формалізації структур геометричних елементів із урахуванням векторних параметрів фігур (ліній, дуг, кіл), який дає змогу автоматизувати перевірку на цілісність та ефективно підготувати креслення до генерування G-Code. Отримані результати доцільно застосувати під час розроблення інтелектуальних систем підтримки інженерних рішень, а також адаптивних модулів для цифрових платформ виробничого циклу.

Ключові слова: геометричні структури; нормалізація елементів креслення; впорядкування фігур креслення; нормалізація системи координат; виробничі процеси; формування замкнутих контурів.

Вступ / Introduction

Автоматизація процесу розроблення та структуризації геометричних елементів креслень є ключовим викликом у сучасному машинобудуванні, інженерії та цифрових технологіях. Особливої актуальності набуває завдання уніфікації та структуризації геометричних елементів креслень у вигляді повторюваних геометричних структур, що забезпечує гнучке повторне використання геометричних даних і скорочує тривалість підготовки виробництва.

У світовій науковій літературі питання автоматизації інженерної графіки розглядають провідні дослідники, зокрема – Jean-Philippe Pernot, який досліджує реконструкцію 3D CAD-моделей з ортогональних 2D-креслень [13]. Досвід таких досліджень свідчить про актуальність і важливість розроблення нових методів трансформації креслень у стандартизовані цифрові формати, здатні інтегруватися в сучасні виробничі процеси.

Об'єкт дослідження – структуризація геометричних елементів креслення.

Предмет дослідження – методи і засоби структуризації геометричних елементів технічних креслень для CAD/CAM-систем, які забезпечать безперервність зовнішніх і внутрішніх його контурів.

Мета роботи – розробити метод структуризації геометричних елементів технічних креслень для їх інтеграції в автоматизовані CAD/CAM-системи, що забезпечить їх уніфіковане позиціонування у координатному просторі.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- систематизувати сучасні підходи до формалізації та структурного подання геометричних елементів технічних креслень у цифровому середовищі, що дасть змогу адаптувати їх до потреб сучасних CAD/CAM-систем і скоротити тривалість підготовки до виробництва;
- розробити алгоритми коригування координат і впорядку-

Інформація про авторів:

Хомин Максим Тарасович, магістр, аспірант, кафедра інформаційних систем та комп'ютерного моделювання.

Email: khomyn.maksym@nltu.lviv.ua; <https://orcid.org/0009-0000-8325-7271>

Сторожук Олександр Леонідович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних систем та комп'ютерного моделювання. Email: storozhuk@nltu.lviv.ua; <https://orcid.org/0000-0001-6566-5271>

Цитування за ДСТУ: Хомин М. Т., Сторожук О. Л. Метод структуризації геометричних елементів креслення для CAD/CAM-систем. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 4. С. 166–171.

Citation APA: Khomyn, M. T., & Storozhuk, O. L. (2025). Method for structuring geometric elements of drawings for CAD/CAM systems. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 166–171. <https://doi.org/10.36930/40350419>

вання геометричних фігур, які забезпечать безперервність зовнішніх і внутрішніх контурів технічного креслення;

- запропонувати методику нормалізації елементів креслення за опорною точкою, що забезпечить їх уніфіковане позиціонування у координатному просторі;
- виявити повторювані геометричні структури у кресленнях, що дасть можливість ефективного їх збереження та повторного використання для подальшого проєктування;
- визначити перспективи застосування штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання повторюваних геометричних структур.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження [4] пропонує інноваційний підхід до аналізу геометричних об'єктів з використанням сучасних алгоритмів машинного навчання для виявлення повторюваних структур елементів і геометричних аномалій. Ця робота має важливе значення для автоматизації контролю якості геометричного проєктування в CAD-системах, проте обмежується двовимірними даними. Подальші дослідження могли б розширити методику на 3D-моделі.

У роботі [9] досліджено вплив G-коду на механічні властивості екструдованих деталей. Автори демонструють, що програмне управління параметрами екструзії дає змогу покращити міцність виробів. Однак робота не враховує впливу матеріалів із пам'яттю форми, що могло б стати перспективним напрямом для подальших досліджень.

Автори роботи [13] розробляють метод автоматичного відтворення 3D CAD-моделей на підставі ортогональних креслень. Їхній підхід значно пришвидшує процес проєктування, але має обмеження щодо складних поверхонь із неявними геометричними зв'язками. Аналогічне дослідження [3] пропонує альтернативні методи генерування 2D-креслень із 3D-моделей, що є важливим для зворотного інжинірингу.

Робота авторів [7] зосереджена на моделюванні напружень під час витягування оптичних волокон. Хоча дослідження ґрунтується на 2D-симуляції, воно пропонує цінні інсайти для удосконалення виробничих параметрів. Проте перехід до 3D-моделювання міг би підвищити точність прогнозування.

Автори дослідження [10] розробляють метод топологічного порівняння 2D-креслень із 3D-моделями, що особливо актуально для хімічної та нафтогазової промисловості. Їхній підхід дає змогу автоматизувати перевірку відповідності проєктної документації, але потребує подальшого вдосконалення для роботи з нестандартними геометриями.

У дослідженні [1] пропонується ранній метод автоматичного розпізнавання технологічних елементів (наприклад, отворів, пазів) у 2D-кресленнях. Незважаючи на застарілість алгоритмів, ця робота стала основою для сучасних підходів із застосуванням глибокого навчання.

Отже, внаслідок аналізу останніх досліджень та публікацій не було виявлено узагальненого підходу до автоматизації процесу оброблення креслень через геометричні структури, що підтверджує актуальність і новизну нашого дослідження.

Матеріали та методи дослідження. У роботі використано комплекс теоретичних та емпіричних методів дослідження. Теоретичні методи містять критичний аналіз, узагальнення та систематизацію літературних джерел щодо утворення геометричних структур креслень. Із емпіричних методів застосовано комп'ютерне моделювання, аналіз алгоритмів, практичне тестування

моделей у CAD-середовищі, а також елементи моделювання як прогностичного методу. Це дало змогу оцінити ефективність запропонованих підходів до удосконалення геометричних елементів для систем з числовим програмним керуванням.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Автоматизація процесу розроблення та оформлення креслень шляхом формалізації й структуризації їхніх геометричних елементів є важливою проблемою для розвитку сучасних технологій проєктування у машинобудуванні та інших галузях промисловості. Завдання полягає в удосконаленні геометричних елементів креслень для підвищення точності, ефективності та зниження витрат часу на виробничі операції їхнього розроблення. Для цього важливо використовувати структуровані геометричні конфігурації, які не тільки зберігають базові характеристики, а й дають можливість їх належного подання для подальшого застосування в автоматизованих системах проєктування (CAD) та оброблення на верстатах з ЧПК. Однією з основних проблем є коригування координат, впорядкування елементів креслень та інтеграція цих даних у програмне середовище. Вирішення цих проблем забезпечить точність та безпеку оброблення креслення.

Потрібно удосконалити взаємне розташування всіх фігур у межах креслення для забезпечення їх коректного об'єднання у безперервні контури. У деяких випадках може виникнути ситуація, коли одна фігура завершується в певній точці (X_n, Y_n) , а інша починається в цій самій точці (X_m, Y_m) , проте їх порядок у загальному переліку елементів розміщення не є наступним. Тобто виконується рівність $(X_n, Y_n) = (X_m, Y_m)$, але їхні індекси в переліку фігур не відповідають логічному порядку $(n \neq m + 1)$ [4].

Щоб усунути таку невідповідність, потрібно впорядкувати геометричні фігури креслення відповідно до їх просторової послідовності та логіки з'єднання. Алгоритм виконує перевірку кінцевої точки однієї фігури та початкової точки іншої, що забезпечує правильний порядок зображення геометричних елементів у геометричній структурі [13].

Коригування координат виконаємо за допомогою першочергового зв'язування елементів у логічні послідовності множин, таких як $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, де фігуру як елемент множини можна спростити до двох точок початку та кінця. Множини елементів формують замкнуті та незамкнуті контури. Контур вважають замкнутим, якщо кінець останньої фігури у множині припадає на початок першої, за такою формулою:

$$f_i = (P_s^i, P_e^i), \forall i \in m, \quad (1)$$

де: i – індекс фігури у множині; s – індекс початкової фігури; P_s^i – точка i -тої поточної фігури, яка належить s -ій початковій фігурі; e – індекс безпосередньої фігури.

Для пов'язування геометричних фігур у множини важливо виконати наступні кроки алгоритму вимірювання відстаней фігури f_i до усіх сусідніх, та знаходження найближчої відстані. Відстані вимірюють за допомогою формули

$$D(P_c, P_j) = \sqrt{(x_c - x_j)^2 + (y_c - y_j)^2}, \forall j \in R, \quad (2)$$

де: $P_c = (x_c, y_c)$ – координати контрольної (поточної) точки; c – індекс точки P_c ; $P_j = (x_j, y_j)$ – координати точ-

ки сусідньої фігури-кандидата; j – індекс точки P_j ; $D(P_e, P_j)$ – відстань між точками P_e та P_j , яку використовують для визначення найближчої фігури під час впорядкування.

Важливо зазначити, що з кожною наступною ітерацією кількість фігур, які залишаються для пошуку, зменшується. Це можна пояснити тим, що на попередніх кроках алгоритму вже було впорядковано певну кількість елементів множини. Така динаміка простежується завдяки залежності [4]

$$j = n - \text{current}, \quad (3)$$

де: j – кількість фігур, що залишилися для пошуку; n – загальна кількість фігур у множині, current – поточний номер ітерації (кількість уже впорядкованих фігур).

Наступним кроком виконаємо зміну послідовності фігур, використовуючи множину фігур на p -тій ітерації впорядкування $F_p = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, яка має мінімізувати сумарну відстань між послідовними фігурами. Цільову функцію можна подати у вигляді

$$D_{\text{total}} = \sum_{j=1}^{n-c} D_j(P_e^c, P_s^j) \rightarrow \text{extr}, \quad (4)$$

де: D_{total} – загальна довжина переходів між фігурами; $D_j(P_e^c, P_s^j), \forall j \in R$ – відстань між кінцевою точкою попередньої фігури та початковою точкою наступної; s – індекс початкової фігури; e – індекс кінцевої фігури; c – кількість уже впорядкованих фігур; n – загальна кількість фігур.

Фігури, що залишаються після вибору початкової, формують множину залишкових фігур: $R = F \setminus \{f_o\}$. На кожному кроці алгоритму обчислюється найменша відстань між останньою впорядкованою фігурою f_i та однією з фігур f_t із множини R . Знайдену фігуру f_t вважають наступною у впорядкованому переліку, додають до результату та вилучають із множини R . Цей процес повторюється доти, поки множина R не стане порожньою. Пошук найближчої фігури можна виконати за формулою

$$t = \arg \min_{j \in R} D(P_e^c, P_s^j), \quad (5)$$

де: j – індекс фігури із множини залишкових фігур R ; t – індекс фігури f_t , яка має мінімальну відстань до поточної фігури.

На початковому етапі розроблення структури креслення потрібно проаналізувати геометричні параметри та розмістити його в найзручнішому місці для подальшого використання. Для цього спочатку передбачені мінімальні координати креслення осями X та Y , що дає змогу встановити крайнє ліве та нижнє положення. Використовуючи метод повного перебору всіх геометричних елементів креслення, знаходять точку, яка має найменше значення координати X (X_w) і точку з найменшим значенням координати Y (Y_w). Ця точка (X_w, Y_w) створює новий початок координат, до якого буде прив'язане креслення у геометричній структурі [9].

Після визначення опорної точки виконують коригування всіх координат креслення так, щоб вони були віднесені до нової початкової координати. Оновлення координат кожного елемента (ліній, дуг, кіл) гарантує, що креслення буде правильно масштабовано та розташоване в зручному форматі, що особливо важливо для автоматизованої системи оброблення даних. Стандартизована інтеграція креслень у програмне середовище мінімізує ймовірність помилок за їх використання у різних виробничих процесах.

Подання креслень у вигляді структурованих геометричних конфігурацій потребує не тільки збереження базових їх геометричних характеристик, а й уточнення їхнього подання для подальшого використання у проектуванні та виробництві. Використання стандартних структур геометричних елементів дає змогу автоматизувати процес розроблення креслень, зменшуючи кількість ручних рутинних операцій і підвищуючи точність розпізнавання повторюваних елементів. Застосування повторюваних геометричних структур спрощує процес редагування креслення, оскільки дає змогу змінювати окремі його елементи групи без необхідності оновлювати усі вузли креслення. Завдяки такому підходу забезпечується швидка адаптація креслень до змін у виробничому технологічному процесі.

Одним із ключових аспектів застосування структурованих геометричних конфігурацій креслень є їхня інтеграція із системами автоматизованого проектування (CAD) та підготовка до подальшого використання у виробництві. Автоматизоване розроблення геометричних структур дає змогу уникнути помилок, пов'язаних із людським фактором, а також спрощує процес конвертації креслень у програмний код для верстатів з ЧПК. Упровадження цього методу підвищує точність, продуктивність та уніфікацію проєктної документації, що є основним фактором у сучасному машинобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості [4].

Під час оброблення креслення у вигляді повторюваних структур геометричних елементів необхідні базові геометричні елементи, з яких воно складається. В основі будь-якого креслення знаходяться прості фігури, зокрема – лінії, дуги та кола, кожен з яких описує певний векторний набір параметрів у форматі. Лінія створена координатами двох точок – початкової (X_n, Y_n) і безпосередньої (X_k, Y_k), які забезпечують її положення у просторі. Дуга додатково характеризується центром (X_c, Y_c), що дає змогу точно застосувати її кривизну та радіус. Коло ж подано координатами центру (X_c, Y_c) і додатковою точкою на його контурі (X_k, Y_k). Якщо дугу використовують для побудови повного кола, її початкова та остаточна точки збігаються, що дає змогу уникнути дублювання інформації у геометричних структурах. Дуги, як елементи, що формують кола, потребують окремого розгляду у процесі оброблення креслень. Вони потребують особливого коригування координат відповідно до вимог специфікації G-Code [4].

Уніфіковане розміщення креслень у віртуальній системі координат дає змогу значно спростити роботу з ними, зокрема – у випадках, коли вони використовуються для автоматизованого проектування або підготовки до виробництва. Завдяки такій стандартизації, креслення легше адаптувати до змін у технологічних процесах або нових вимог замовника, що робить метод структуризації геометричних елементів креслення незамінним у сучасному конструкторському та інженерному середовищі.

Якщо коло не має зв'язку з іншими елементами креслення, це може призвести до виникнення холостого ходу інструменту під час виконання траєкторії на верстаті з ЧПК. Для удосконалення такого процесу потрібно застосувати найзручнішу точку для початку розрізання цього кола, а саме таку, яка є найближчою до точки завершення попереднього елемента [7].

Визначаємо вектор, що прямує з центра кола через точку на цьому колі за допомогою формули [4]

$$\left. \begin{aligned} V_x &= X_p - X_c \\ V_y &= Y_p - Y_c \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де: p – точка початку холостого ходу; c – центр кола.

Розраховуємо відстань між центром кола та заданою точкою за формулою

$$D = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \quad (7)$$

де: x та y – вказує на вектор із центра кола у напрямку точки на колі.

Визначаємо напрямок від центра кола до заданої точки за формулою

$$U_x = \frac{V_x}{D}, U_y = \frac{V_y}{D}. \quad (8)$$

Розраховуємо координати точки на колі, яка розташована найближче до заданої точки, використовуючи формулу

$$\left. \begin{aligned} X_p &= X_c + r \cdot U_x \\ Y_p &= Y_c + r \cdot U_y \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де r – радіус кола.

Креслення має мати чітко визначений зовнішній контур, який є суцільним, а всі додаткові елементи мають розташовуватися в цьому внутрішньому контурі. Елементи, що розташовані за межами основного контура, необхідно розглянути як окремі контури. У разі, якщо контур буде розірваним, виникає складність у визначенні, до якої частини загальної розгортки він належить, що ускладнює подальшу автоматизацію процесу параметризації розміщень елементів [10].

Проте розірваний контур може бути допущений як похибка, яку можна компенсувати за допомогою діаметра фрези, що використовується для оброблення деталей. Якщо розрив контура є необхідним, доцільно вказати такі розриви умовними лініями [1], які не будуть фізично впливати на креслення, але допоможуть виконати алгоритм коректно, а також обробити креслення за допомогою наступних етапів.

Використавши параметри коригування похибок, зокрема радіус $D_{correction}$, можна вважати, що всі точки, які розташовані в межах цього радіуса, належать до допустимої зони розриву контура. Це формалізується через таку умову:

$$D(P_e^c, P_s^j) \leq D_{correction}, \quad (10)$$

де $D_{correction}$ – допустимий радіус коригування.

У процесі структуризації геометричних елементів креслення важливим завданням є пошук та індексація геометричних структур, які складаються з окремих фігур або їх комбінацій, що повторюються у різних частинах креслення. Геометрична структура може поєднувати набір фігур або ж складатись із окремої фігури, також може повторюватися не залежно від фактичного розміщення у відносній системі координат. Для виявлення таких геометричних структур потрібно провести індексацію всіх можливих варіантів композиційної фігури та порівняти їх між собою. Для підвищення ефективності алгоритму потрібно уникати зайвих порівнянь, пропускаючи ті, які з самого початку не можуть бути однаковими [3].

Проведемо нормалізацію фігур, змістивши їх у початок відносної системи координат пошуком крайньої лівої точки креслення – ця точка є віртуальною, і її координати можуть бути збірними та належати кільком фігурам, використовуючи таку систему формул:

$$\left. \begin{aligned} X_m &= \min_i (\min(X_s^i, X_e^i)) \\ Y_m &= \min_i (\min(Y_s^j, Y_e^j)) \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

де: X_s^i, X_e^i – початкова та кінцева координати фігури f_i по осі X ; Y_s^j, Y_e^j – відповідні координати по осі Y ; X_m, Y_m – координати точки, до якої виконується нормалізація (зміщення) фігур.

Наступним кроком є перенесення всіх точок креслення у нову систему координат зі зміщенням на віртуальну точку, що забезпечує нормалізацію координат відносно нового їх початку, за такою системою формул:

$$\left. \begin{aligned} P_s^i &= (X_s^i - X_m, Y_s^j - Y_m) \\ P_e^i &= (X_e^i - X_m, Y_e^j - Y_m) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

де: P_s^i – координати початкової точки i -го геометричного елемента після перенесення у нову (нормалізовану) систему координат з початком у віртуальній точці (X_m, Y_m) ; P_e^i – координати кінцевої точки того ж самого i -го елемента після того ж самого зсуву (нормалізації).

Використовуючи цей підхід, здійснимо перевірку на повторювану геометричну структуру – розмістивши оригінальну множину елементів, та зразок фігур для порівняння у початку координат із додатковими маніпуляціями, такими як обертання фігур, та застосування повної перевірки збігу чи ні. Окрім обертання, важливим є дзеркальне відображення фігур. Для перевірки дзеркального відображення потрібно знайти віртуальні точки, що відображають крайнє положення множини фігур, використавши модифікацію формули (11), із поправкою на значення кутових точок. Алгоритм зупиняє перевірку на сумісність фігур за першого незбігу, та продовжує перевіряти наступні підмножини в ітерації, поки всі фігури не будуть проіндексовані.

Виявлено, що обраний підхід до автоматизації процесу структуризації геометричних елементів може стати вимогою до розроблення ефективних геометричних структур із належним упорядкуванням геометричних елементів у логічній послідовності, яка забезпечує їхнє коректне оброблення в автоматизованих системах. Це важливо в разі передачі креслень на верстати з числовим програмним керуванням, де будь-яке порушення порядку елементів або помилка у координатах може призвести до неточностей у виготовленні деталей.

Запропонований алгоритм передбачає сортування геометричних фігур за критерієм сумісності граничних точок, демонструє високу ефективність у забезпеченні безперервності зовнішнього та внутрішніх контурів. Завдяки цьому вдалося мінімізувати кількість логічних розривів між фігурами, що, своєю чергою, сприяє точнішому формуванню траєкторії інструмента. Особливе значення має підхід до визначення початкової координати креслення, який полягає у пошуку найменших значень осями X та Y , що дає змогу уніфікувати розміщення геометричних елементів у межах координатного простору. Цей підхід гарантує правильне масштабування та позиціонування об'єктів за їх безпосередньої інтеграції в CAD/CAM-системи.

Інша важлива проблема – це коректне об'єднання простих фігур (ліній, дуг, кіл) у замкнуті контури. Визначення таких контурів дає змогу автоматизувати перевірку цілісності креслення та спрощує його подальше оброблення. У цьому аспекті особливу увагу потрібно приділити дугам, які утворюють повні кола або є їх частинами. Під час оброблення таких елементів важливо

враховувати їхню відносну позицію до попередніх елементів у геометричній структурі, щоб уникнути холостих переміщень інструмента. Запропонований метод визначення найближчої точки на колі до заданої координати дає змогу ефективно обрати належну точку входу, що значно підвищує швидкість та точність оброблення таких елементів.

Окрім технічного впорядкування геометричних фігур, дослідження також охоплює питання інтеграції отриманих геометричних структур у програмні середовища. Стандартизація геометричних елементів і послідовностей дає змогу спростити перехід від креслення до його цифрового подання, враховуючи генерацію G-коду для ЧПК-обладнання. Це не тільки зменшує кількість помилок через людський фактор, але й значно скорочує тривалість підготовки креслень до виробництва. Так, використання повторюваних геометричних структур сприяє уніфікації технічної документації, що є потрібною умовою для масового виробництва деталей у сучасному машинобудуванні.

Варто звернути увагу на ситуації, коли контур креслення є розірваним. У таких випадках автоматизація може стикатися із труднощами в ідентифікації структурних одиниць. Проте, якщо розрив не є критичним і піддається компенсації за рахунок інструмента (наприклад, фрези відповідного діаметра), система може обробляти такі дані як допустимі відхилення. Водночас, якщо розрив контура є запланованим, його необхідно явно вказати в параметрах геометричної структури, щоб уникнути двозначності у подальшому використанні креслення.

Загалом результати дослідження підтверджують доцільність використання структурованих геометричних елементів креслень для автоматизації процесу підготовки технічної документації. Це дає змогу досягти не тільки точності та ефективності, але й гнучкості в адаптації креслень до нових технологічних умов і вимог виробництва. Запропоновані методи формалізації та коригування геометричних даних можуть бути легко інтегровані в сучасні CAD/CAM-системи, що відкриває нові перспективи для їхнього практичного застосування.

Обговорення результатів дослідження. Результати здійсненого дослідження корелюють із сучасними науковими працями з автоматизації процесів генерування креслень та інтеграції штучного інтелекту в CAD/CAM-середовище. Зокрема, у праці [6] запропоновано трансформерну архітектуру для автоматичного розроблення CAD-моделей на підставі текстових описів. Вказана методика акцентує увагу на генеруванні моделей із нуля, що є напрямом доповненої автоматизації проєктування.

У роботі [2] представлено систему CAD-Coder, яка забезпечує створення редагованих CAD-скриптів з геометричними анотаціями. Це важливо з погляду формалізації технічної документації та є спорідненим підходом до збереження і параметризації геометричних об'єктів.

Обидві системи мають на меті скорочення ручної праці під час розроблення креслень.

У роботі [11] дослідники інтегрували дифузійні моделі генеративного ШІ для розроблення CAD-дизайнів у середовищах з обмеженим обсягом навчальних даних. Хоча метод істотно відрізняється технічно, спільним є прагнення до зниження людської участі у підготовці креслень, а також зменшення часу проєктування.

У дослідженні [5] висвітлено автоматизовану перевірку креслень штампів у галузі автомобільної промис-

ловості, що можна досягти у спосіб ітеративної взаємодії між ШІ-модулем і САПР. Такий тип логіки, який також реалізується через шаблонні структури, демонструє потенціал для інтеграції нашого методу у галузі контролю якості.

У роботі [12] подано підхід Text2CAD – дифузійну систему, яка перетворює текстові специфікації у 3D-моделі через ортогональні проєкції. Хоча це рішення орієнтоване на синтез креслень із тексту, спільною рисою з нашим підходом є системна структуризація геометрії для подальшого аналізу та формалізації.

У публікації [8] зацентовано на використанні мов скриптів у непараметричних CAD-програмах. Автори демонструють, як автоматизація через шаблони високого рівня дає змогу уникати ручного дублювання креслень.

Відповідно до обговорення результатів дослідження на цю тематику можна вважати, що існує недосліджена область пошуку та розпізнавання повторюваних геометричних структур технічного креслення.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримав подальший розвиток метод структуризації геометричних елементів технічних креслень, який, на відміну від наявного, поєднує коригування координат геометричних фігур, сортування за сумісністю граничних точок, визначення віртуального початку координат, ідентифікацію повторюваних структур, перевірку цілісності контурів, а також забезпечує уніфіковане розміщення геометричних фігур та їх ефективне внесення у CAD/CAM-системи з можливістю автоматичної генерування G-коду.

Практична значущість результатів дослідження – використання результатів дослідження дасть змогу автоматизувати підготовку графічної документації, скоротити тривалість проєктного циклу, мінімізувати людський фактор для оброблення технічних креслень, а також адаптувати геометричні структури для багаторазового використання у виробництві з ЧПК-обладнанням, зокрема – під час серійного виготовлення деталей.

Висновки / Conclusions

Розроблено метод структуризації геометричних елементів технічних креслень для їх інтеграції в автоматизовані CAD/CAM-системи, що забезпечує їх уніфіковане позиціонування у координатному просторі. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Систематизовано сучасні методи утворення геометричних структур елементів креслень, що дало змогу сформулювати підхід до їх уніфікації та стандартизації.
2. Запропоновано методи удосконалення геометричних елементів креслень (охоплюючи коригування координат і впорядкування елементів), що дають змогу скоротити виробничий цикл і знизити ризик помилок, спричинених людським фактором.
3. Досліджено значення використання повторюваних геометричних елементів у конструкторській та інженерній практиці, що сприяє підвищенню продуктивності та якості технічної документації.
4. Розроблено алгоритми автоматичного коригування координат і логічного структурування елементів креслення. Це дало змогу забезпечити безперервність контурів і зменшити холості переміщення інструмента під час оброблення.

5. Встановлено, що запропонована методика ефективна для стандартизованих деталей, що сприяє гнучкості за повторного використання креслень у різних галузях промисловості, але потребує адаптації для оброблення складних органічних форм.
6. З'ясовано, що впровадження технології потребує модернізації програмно-апаратного забезпечення підприємств і є перспективним кроком у розвитку автономних виробничих систем.
7. Окреслено перспективи подальших досліджень, зокрема – у спосіб інтеграції методів машинного навчання для автоматичного коригування креслень і скорочення тривалості оброблення геометричних графічних об'єктів.
8. Запропоновано напрям подальшого розроблення відкритих баз геометричних структур креслень для міжгалузевого використання з акцентом на універсальність і стандартизацію, що забезпечить скорочення виробничого циклу.
9. Наголошено, що подальший розвиток технології потребує міждисциплінарної співпраці між інженерами, розробниками програмного забезпечення та виробничими підприємствами для формування єдиних стандартів.

References

1. Cayiroglu, I. (2009). A new method for machining feature extracting of objects using 2D technical drawings. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1158–1164. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.07.004>
2. He, C., Zhang, S., Zhang, L., & Miao, J. (2025). CAD-Coder: Text-guided CAD files code generation. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.08686>
3. Jin, S., Zhang, Y., Yamazaki, T., & Jiang, Z. (2021). Automatic 3D CAD model and 2D drawings generation in construction engineering. Automation in Construction. *Journal of Physics: Conference Series*, 1827, article ID 012115. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1827/1/012115>
4. Khomyn, M. T., & Storozhuk, O. L. (2024). Identification of template elements and anomalies using graphical data analysis. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects International Science-Practical Conference*, October 23–25, 2024, Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.36930/conf150.5.23>
5. Lee, J., Kim, T.-H., Jeon, S.-H., Park, S.-H., Kim, S.-H., Lee, E.-H., & Lee, J.-H. (2023). Automation of trimming die design inspection by zigzag process between AI and CAD domains. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.16866>
6. Liao, J., Xu, J., Sun, Y., Tang, M., He, S., Liao, J., Yu, S., Li, Y., & Xiao, H. (2025). Automated CAD modeling sequence generation from text Descriptions via Transformer-Based Large Language Models. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.19490>
7. Liu, J., & Zheng, L. (2023). Control of stress distribution during large radius fiber optic taper drawing process based on 2D simulation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 616, article ID 122466. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2023.122466>
8. Moreno, R., & Bazán, A. M. (2017). Design automation using script languages: High-level CAD templates in non-parametric programs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245(6), article ID 062039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/6/062039>
9. Rivet, I., Dialami, N., Cervera, M., Chiumenti, M., & Valverde, Q. (2023). Mechanical analysis and optimized performance of G-Code driven material extrusion components. *Additive Manufacturing*, 61, article ID 103348. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103348>
10. Wen, R., Tang, W., & Su, Z. (2017). Topology based 2D engineering drawing and 3D model matching for process plant. *Graphical Models*, 92, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2017.06.001>
11. Wu, X., Lin, Z., Zhou, K., Wang, X., Song, K., Fu, J., & Liao, Z. (2025). Generative AI and CAD automation for diverse and novel mechanical component designs under data constraints, 7, article ID 315. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06833-5>
12. Yavartanoo, M., Hong, S., Neshatavar, R., & Lee, K. M. (2024). Text2CAD: Text to 3D CAD generation via technical drawings. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.06206>
13. Zhang, C., Pinquie, R., Polette, A., Carasi, G., De Chamace, H., & Pernot, J.-P. (2023). Automatic 3D CAD models reconstruction from 2D orthographic drawings. *Computers & Graphics*, 114, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.05.021>

M. T. Khomyn, O. L. Storozhuk

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

METHOD FOR STRUCTURING GEOMETRIC ELEMENTS OF DRAWINGS FOR CAD/CAM SYSTEMS

The article presents an in-depth study of a modern method for automating the creation and documentation of technical drawings by transforming them into standardized geometric structures. This methodology plays a crucial role in the development of digital production technologies, particularly in mechanical engineering, industrial design, furniture manufacturing, and construction, where accuracy, repeatability, and documentation consistency are vital for ensuring high product quality. The research emphasizes how the use of structured geometric representations facilitates the unification of drawing formats, reduces human error and accelerates the engineering workflow. Key aspects of the method include the optimization of geometric drawing elements through sorting algorithms based on endpoint compatibility, correction of coordinates by referencing virtual anchor points and the formation of both closed and open contours to support continuous tool trajectories. A novel approach is proposed for defining the origin point of drawings using the minimal X and Y coordinates, which enables normalized placement of figures and enhances integration into CAD systems. The study describes a series of algorithms for minimizing distances between drawing entities, which improves cutting path efficiency on CNC equipment and reduces idle movements. It also outlines a framework for identifying and indexing repeating patterns composed of individual or grouped vector shapes such as lines, arcs, and circles. Special focus is given to ensuring contour integrity, identifying contour breaks, and implementing conditional markers to manage allowable deviations in automated manufacturing. The proposed methods enable high flexibility when updating drawings in response to technological changes and offer significant benefits for reuse and cross-domain application. The work highlights the possibility of incorporating artificial intelligence to predict optimal drawing parameters, adapt geometric structures automatically, and enhance decision-making in design environments. Additionally, the article considers the challenges of integrating geometric structures into software systems that generate machine code for CNC tools, as well as the role of digital twins in simulation and validation. It demonstrates that the suggested formalization approach for parameterized geometric configurations allows for precise digital interpretation of engineering documentation. These advancements provide a foundation for the development of intelligent CAD/CAM modules capable of recognizing and adapting geometric data in real-time. The research findings are applicable to mass production workflows and can serve as a basis for future interdisciplinary research involving AI-assisted design, geometry-driven quality control, and template-based generative engineering.

Keywords: geometric structures; normalization of drawing elements; arrangement of drawing figures; normalization of drawing coordinates; production processes; formation of closed contours.