

Короткіх В.М.<https://orcid.org/0009-0004-1783-2513>

Національний університет «Львівська політехніка»

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

У статті розглянуто проблему організації інтелектуального пошуку інженерних даних у системах автоматизованого проєктування, де значні обсяги САД-файлів, креслень, специфікацій і супровідних атрибутів накопичуються протягом усього життєвого циклу виробу. Показано, що традиційний пошук за назвою файлу, автором, датою створення або окремими текстовими полями не забезпечує достатньої повноти й релевантності, оскільки не враховує геометричну структуру, топологічні зв'язки, функціональне призначення елементів і контекст використання проєктного рішення. Метою роботи є формування концептуальної моделі пошукової системи для САПР, яка поєднує семантичний пошук, онтологічне моделювання, граф знань і векторне подання інженерних даних. Запропонована модель описує узгоджену послідовність етапів: отримання та нормалізацію САД-даних, декомпозицію моделей і креслень, виділення геометричних, топологічних та атрибутивних ознак, побудову семантичних анотацій, формування векторних подань, індексацію у векторній базі даних, інтерпретацію запиту користувача, семантичне зіставлення та ранжування результатів. Особливу увагу приділено ролі онтології предметної області, яка задає спільний словник понять, властивостей і відношень, а також графа знань, що фіксує зв'язки між моделями, деталями, матеріалами, технологічними операціями, стандартами та функціями виробу. На відміну від підходів, орієнтованих лише на зовнішню подібність форми, концептуальна модель спрямована на врахування конструкторського наміру та можливість повторного використання інженерних рішень за змістом. У роботі не подаються результати експериментального тестування; запропонований підхід розглядається як архітектурна й методологічна основа для подальшої реалізації прототипу, добору метрик релевантності та перевірки на реальних наборах САД-файлів. Практичне значення моделі полягає у створенні передумов для скорочення часу пошуку, зменшення дублювання проєктних рішень, підвищення інтегруєбельності між САД, PDM і PLM-середовищами та підтримки цифрового виробництва в умовах Industry 4.0.

Ключові слова: САПР, САД, семантичний пошук, онтологія, граф знань, векторне подання, інженерні дані, повторне використання проєктних рішень.

Постановка проблеми. Сучасні системи автоматизованого проєктування (САД) широко застосовуються в інженерній діяльності для створення, редагування та зберігання технічної документації у векторних форматах. У процесі розробки складних виробів формується значний обсяг графічних даних, що включає креслення, схеми, специфікації та інші типи документів. Зі зростанням кількості таких даних актуалізується проблема їх ефективного пошуку, повторного використання та інтеграції [1].

Існуючі підходи до організації пошуку в САД-системах переважно базуються на метаданих (назва файлу, автор, дата створення) або текстових атрибутах, що супроводжують графічні об'єкти. Проте такі методи не враховують змістовну (семантичну) складову креслень і не дозволяють

здійснювати пошук за геометричними характеристиками, топологічними зв'язками чи функціональним призначенням елементів. У результаті користувачі стикаються з труднощами при знаходженні релевантних документів, особливо у великих архівах технічної документації [2].

Додатковою проблемою є різноманітність форматів САД-файлів (наприклад, DXF, DWG, SVG тощо), що ускладнює уніфікований підхід до їх аналізу та індексації. Відсутність єдиної концептуальної моделі, яка б враховувала як геометричні, так і семантичні аспекти графічних об'єктів, обмежує можливості створення ефективних пошукових систем у цій галузі.

Таким чином, виникає необхідність у розробці концептуальної моделі пошукової системи САД-файлів, яка забезпечить: формалізоване представ-



лення структури графічних даних, інтеграцію геометричних і семантичних характеристик об'єктів, підтримку інтелектуального пошуку за змістом креслень, підвищення ефективності повторного використання інженерних рішень.

Розв'язання цієї проблеми є важливим для підвищення продуктивності проектування, зменшення дублювання розробок та забезпечення ефективного управління знаннями в інженерних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема пошуку та повторного використання CAD-моделей досліджується в кількох взаємопов'язаних напрямках: атрибутивний і текстовий пошук, геометричний пошук за формою, використання дескрипторів і графових подань, семантичне збагачення моделей, а також застосування методів машинного та глибокого навчання. Систематичний огляд сучасних підходів до пошуку 3D CAD-моделей у проектуванні машинних деталей показує, що ефективно повторне використання наявних моделей може скорочувати цикл розроблення, однак потребує врахування не лише подібності форми, а й вимог конкретної стадії проектування [1, с. 752–774].

Перші практичні підходи до організації пошуку були пов'язані з аналізом назв файлів, каталогів, атрибутів документа та текстових описів. Їхньою перевагою є простота реалізації та сумісність із більшістю наявних файлових сховищ. Однак вони суттєво залежать від дисципліни заповнення метаданих, мови опису, локальних правил найменування та повноти супровідної документації. У застарілих архівах частина таких даних часто відсутня або є суперечливою, тому пошук за ключовими словами не забезпечує повного відтворення інженерного змісту моделі.

Другий напрям пов'язаний із геометричним пошуком, у якому CAD-модель описується через глобальні або локальні дескриптори форми. До глобальних дескрипторів належать статистичні характеристики, моменти, розподіли відстаней, орієнтацій або проєкцій; до локальних – ознаки окремих конструктивних елементів, таких як отвори, пази, фаски, кишені, ребра жорсткості чи поверхні певного типу. Огляд 3D object recognition and classification демонструє різноманіття подань тривимірних об'єктів і критеріїв порівняння, але також фіксує залежність результату від якості виділення ознак і вибору міри подібності [4, с. 1243–1292].

Важливим різновидом геометричних методів є пошук на основі регіональної сегментації та

топологічних зв'язків. Наприклад, подання моделі через області, грані, ребра й відношення суміжності дозволяє відображати не лише зовнішню форму, а й структуру об'єкта. Дослідження 3D CAD solid model retrieval based on region segmentation показує доцільність використання регіонів моделі для пошуку подібних твердотільних об'єктів [6, с. 103–121]. Водночас графові методи, зокрема подання B-Рер як графа суміжності граней, створюють основу для зіставлення підструктур і пошуку часткових відповідностей [5].

Окремий напрям формують підходи на основі багатовидових проєкцій. У view-based підході тривимірний об'єкт перетворюється на набір двовимірних зображень із фіксованих ракурсів, після чого задача пошуку може бути інтерпретована як задача розпізнавання видів. Така логіка використана у фреймворку повторного використання 3D CAD-моделей протягом життєвого циклу продукту, де глибинні моделі застосовуються для пошуку за множиною проєкцій [2, с. 82–89]. Перевагою підходу є сумісність із методами комп'ютерного зору, а обмеженням – потенційна втрата точної параметричної та топологічної інформації.

Значний інтерес становлять методи глибокого навчання. Вони дають змогу будувати векторні подання складних геометричних об'єктів, однак вимагають підготовлених наборів даних і уніфікованого формату вхідної інформації. У роботах щодо реконструкції 3D CAD-моделей з технологічними ознаками та розпізнавання machining features використано нейронні мережі для роботи з воксельними, дескрипторними або комбінованими поданнями [3, с. 114–127; 7]. Такі підходи є перспективними, проте для інженерного пошуку важливо зберігати зв'язок результатів нейронної моделі з вихідними CAD-елементами, інакше користувач отримує лише числову подібність без пояснюваного обґрунтування.

Для інтеграції CAD і CAM важливими є методи автоматичного розпізнавання конструктивно-технологічних ознак. Огляд automatic feature recognition techniques систематизує підходи, які використовують графові правила, об'ємну декомпозицію, евристичні, нейронні мережі та гібридні рішення для переходу від геометрії до виробничого змісту [8, с. 83–109]. Для пошукової системи це означає, що релевантність має визначатися не лише за схожістю поверхонь, а й за інженерною інтерпретацією: наприклад, чи є елемент отвором під кріплення, посадковим місцем, технологічною кишенею або декоративною формою.

Семантичний пошук і онтологічне моделювання становлять окремих пласт досліджень. Семантичне збагачення низькорівневих CAD-моделей у PLM-середовищах спрямоване на відновлення зв'язків між геометрією, стандартами, функціями та життєвим циклом виробу [9]. Онтологія дає змогу формалізувати класи об'єктів, властивості, відношення, ієрархії та правила виводу, а граф знань – зберігати й оновлювати конкретні зв'язки між екземплярами. У працях із методології knowledge graphs підкреслюється, що граф знань поєднує дані, схеми та семантичні зв'язки в структурі, придатній для пошуку, інтеграції й логічного виводу [11].

Аналіз публікацій свідчить, що жоден із розглянутих підходів окремо не розв'язує проблему універсального пошуку CAD-даних. Атрибутивний пошук простий, але семантично обмежений; геометричні дескриптори відображають форму, але не завжди фіксують функцію; глибоке навчання забезпечує узагальнені векторні подання, але потребує пояснюваності; онтології структурують знання, проте самі по собі не гарантують швидкого масштабованого пошуку у великих архівах. Отже, актуальною є гібридна концептуальна модель, у якій онтологія, граф знань і векторне подання працюють як взаємодоповнювальні компоненти.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення та опис концептуальної моделі пошукової системи в системах автоматизованого проектування, орієнтованої на семантичний аналіз CAD-файлів і повторне використання інженерних рішень. Модель має визначити загальну архітектуру, основні інформаційні потоки, функції ключових модулів і принципи взаємодії між геометричним, семантичним та векторним рівнями подання даних.

Для досягнення мети поставлено такі дослідницькі завдання: уточнити особливості CAD-даних як об'єкта пошуку; визначити набір ознак, які мають враховуватися під час індексації; описати роль онтології та графа знань у нормалізації термінів і встановленні зв'язків між об'єктами; запропонувати схему формування векторних подань для моделей, креслень і запитів користувача; окреслити механізм ранжування результатів на основі комбінованої релевантності.

Предметом розгляду є не конкретна програмна реалізація пошукового сервісу, а архітектурно-методологічний рівень. Тому в роботі не декларуються експериментально виміряні показники точності, швидкодії або повноти пошуку. Висновки

стосуються логіки побудови моделі, її очікуваних переваг, обмежень і напрямів подальшої перевірки на реальних наборах CAD-файлів.

Об'єктом моделювання є інформаційний простір САПР, що включає CAD-файли різних форматів, векторні креслення, метадані, специфікації, матеріали, технологічні параметри, зв'язки з PDM/PLM-системами та запити користувачів. Кінцевим результатом має бути схема, придатна для подальшого переходу до прототипу семантичної пошукової системи.

Виклад основного матеріалу. Концептуальна модель пошукової системи в САПР ґрунтується на припущенні, що інженерний документ має багаторівневу природу. На синтаксичному рівні він є файлом певного формату; на геометричному рівні – набором примітивів, поверхонь, граней, ребер, кривих або елементів креслення; на атрибутивному рівні – сукупністю назв, розмірів, матеріалів, допусків і параметрів; на семантичному рівні – носієм понять про функцію, конструктивне призначення та технологічний контекст. Пошукова система повинна поєднувати ці рівні, інакше вона або втрачає зміст, або не масштабується до великих архівів.

Першим компонентом моделі є рівень джерел даних. До нього належать CAD-файли у форматах STEP, IGES, DWG, DXF, SVG, STL та нативних форматах CAD-платформ; пов'язані специфікації; технічні описи; бібліотеки стандартних виробів; дані PDM/PLM; історія версій і зміни, внесені в модель. На цьому рівні важливо фіксувати походження даних, версію формату, одиниці вимірювання, систему координат і зв'язки між документами. Така інформація надалі використовується для перевірки сумісності результатів і для пояснення, чому певний файл потрапив до пошукової видачі.

Другим компонентом є модуль попередньої нормалізації. Його завдання полягає у приведенні різнорідних даних до внутрішнього подання, зручного для аналізу. Нормалізація охоплює вилучення службових дублювань, уніфікацію одиниць вимірювання, стандартизацію назв шарів і атрибутів, розпізнавання типів примітивів, виділення структури складання та перевірку наявності критичних полів. Для креслень важливо відокремити графічні об'єкти, розмірні лінії, позначення, текстові виноска та штампи, оскільки кожен із цих елементів має різну роль у пошуку.

Третім компонентом є декомпозиція CAD-об'єкта й виділення ознак. Для твердотільних моделей це можуть бути поверхні, грані, ребра,

отвори, фаски, пази, кишені, різьби, посадкові елементи, симетрії та повторювані патерни. Для двовимірних креслень – контури, вузли, розміри, типи ліній, блоки, шари та текстові пояснення. Ознаки доцільно поділяти на геометричні, топологічні, атрибутивні та контекстні. Геометричні характеризують форму; топологічні – зв'язки; атрибутивні – властивості; контекстні – місце об'єкта в складі виробу або процесі проектування.

Четвертим компонентом є семантична анотація. На цьому етапі виділені ознаки співвідносяться з поняттями предметної області. Наприклад, геометричний елемент, який має циліндричну форму та певні розмірні характеристики, може бути інтерпретований як отвір, посадкове місце або технологічний канал залежно від його зв'язків із іншими елементами. Семантична анотація не повинна зводитися до автоматичного присвоєння тегів. Вона має враховувати ієрархію понять, синонімію, варіанти назв, стандартизовані терміни та обмеження конкретної галузі.

Онтологія предметної області в запропонованій моделі виконує роль формалізованого словника. Вона задає класи об'єктів, властивості, типи відношень і допустимі правила інтерпретації. Наприклад, класи «деталь», «вузол», «отвір», «фаска», «матеріал», «операція оброблення», «стандарт» можуть бути пов'язані відношеннями «входить до складу», «має матеріал», «виконує функцію», «виготовляється операцією», «відповідає стандарту». Наявність онтології дає змогу зменшити неоднозначність запитів і забезпечує узгодженість між різними CAD-платформами.

Граф знань доповнює онтологію конкретними екземплярами та зв'язками. Якщо онтологія описує загальні правила, то граф знань фіксує, що певна модель містить певну деталь, ця деталь має матеріал, пов'язана з технологічною операцією, використовувалась у попередньому виробі та має аналог в іншому проекті. Графове подання особливо корисне для пошуку за непрямыми зв'язками. Користувач може шукати не файл із конкретною назвою, а, наприклад, деталі, які виконують подібну функцію, виготовляються подібною операцією або використовують однаковий стандарт.

П'ятий компонент моделі – формування векторного подання. Векторне подання (embedding) перетворює об'єкт або запит у числовий простір, де близькість векторів відображає змістову, геометричну або комбіновану подібність. Для CAD-даних вектор може формуватися з кількох підвекторів: геометричного, топологічного, тек-

стового, атрибутивного та семантичного. Геометричний підвектор відображає форму; топологічний – структуру зв'язків; текстовий – назви й описи; атрибутивний – параметри; семантичний – поняття, отримані з онтології та графа знань.

Векторна база даних використовується для швидкого пошуку найближчих об'єктів у багатовимірному просторі. Вона не замінює онтологію та граф знань, а забезпечує масштабовану інфраструктуру для попереднього відбору кандидатів. Після отримання множини найближчих векторів система може виконати додаткове семантичне фільтрування, перевірку обмежень і ранжування. Такий гібридний підхід дає змогу поєднати швидкодію векторного пошуку з пояснюваністю, яку забезпечують онтологічні та графові зв'язки.

Обробка запиту користувача в моделі передбачає кілька сценаріїв. Запит може бути текстовим, наприклад «знайти кронштейн із двома отворами під кріплення»; графічним, коли користувач подає ескіз або фрагмент креслення; прикладовим, коли як запит використовується наявна CAD-модель; комбінованим, коли текстове пояснення доповнюється геометричним прикладом. Для кожного сценарію система має побудувати внутрішню модель запиту, виділити ключові поняття, зіставити їх з онтологією і сформувати відповідне векторне подання.

Семантичне розширення запиту є необхідним для подолання синонімії та різних традицій найменування. Наприклад, поняття «кронштейн», «опора», «тримач» або «монтажна пластина» в окремих контекстах можуть бути близькими, але не тотожними. Онтологія повинна задавати ієрархію та зв'язки між такими термінами, а граф знань – підказувати, як вони реально використовувались у попередніх проектах. Завдяки цьому система може знайти релевантні результати навіть тоді, коли користувач не повторює точну назву з архіву.

На етапі зіставлення система порівнює модель запиту з індексованими CAD-об'єктами. Зіставлення має бути багатокритеріальним: текстова близькість важлива для назв і описів; геометрична – для форми; топологічна – для структури; семантична – для функції та контексту; атрибутивна – для матеріалів, розмірів і параметрів. Тому релевантність доцільно розглядати як зважену комбінацію кількох показників, а не як один універсальний коефіцієнт.

У загальному вигляді комбіновану релевантність можна подати так:

$$\text{Rel}(q, d) = \alpha \cdot \text{Ssem}(q, d) + \beta \cdot \text{Sgeom}(q, d) + \gamma \cdot \text{Stop}(q, d) + \delta \cdot \text{Stext}(q, d) + \varepsilon \cdot \text{Smeta}(q, d), \text{ де } q -$$

запит, d – документ або модель, S_{sem} – семантична близькість, S_{geom} – геометрична подібність, S_{top} – топологічна подібність, S_{text} – текстова близькість, S_{meta} – відповідність метаданих, а $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ – вагові коефіцієнти, які налаштовуються відповідно до предметної області.

Подана формула має концептуальний характер. Вона не задає фіксованих значень ваг і не претендує на універсальність для всіх CAD-середовищ. У машинобудуванні більшу вагу може мати топологія й технологічні ознаки; у будівельному проектуванні – класи об’єктів і нормативні параметри; у бібліотеках стандартних виробів – атрибути та відповідність стандарту. Тому модель передбачає можливість адаптації ваг і правил ранжування до конкретного застосування.

Загальна архітектура запропонованої пошукової системи наведена на рис. 1. Вона розділяє офлайн-індексацію інженерних даних і онлайн-обробку запиту користувача. Офлайн-контур виконує декомпозицію, семантичну анотацію, побудову векторних подань та наповнення векторної бази даних. Онлайн-контур аналізує запит, формує його embedding, звертається до індексу, виконує семантичне зіставлення, ранжує результати й передає зворотний зв’язок для подальшого уточнення словників та онтології.

Важливою властивістю моделі є інтероперабельність. Вона досягається завдяки внутрішньому проміжному поданню, яке відокремлює логіку пошуку від конкретного CAD-формату. Перетворювачі форматів відповідають за імпорт і первинне виділення структурних елементів, тоді як семантичне ядро оперує вже нормалізованими поняттями та зв’язками. Такий підхід дає змогу розширювати

систему новими форматами без радикальної зміни модулів ранжування і графа знань.

Ще однією властивістю є пояснюваність результатів. Для інженера недостатньо отримати список файлів, впорядкований за абстрактним числовим балом. Система має пояснювати, які саме ознаки збіглися: подібна конструктивна функція, однаковий тип з’єднання, близькі розміри, відповідність стандарту, наявність аналогічних технологічних операцій або спільний контекст використання. Пояснюваність підвищує довіру до результатів і дає змогу користувачу швидше оцінити, чи справді знайдена модель придатна для повторного використання.

Зворотний зв’язок користувача повинен використовуватися не лише для персоналізації видачі, а й для уточнення семантичного шару. Якщо інженер позначає результат як релевантний або нерелевантний, система може накопичувати інформацію про типові помилки інтерпретації, уточнювати ваги ознак, розширювати словник синонімів і виявляти відсутні зв’язки в графі знань. При цьому важливо відокремлювати індивідуальні вподобання користувача від загальнодоменних правил, щоб не погіршити якість пошуку для інших спеціалістів.

У межах PLM або PDM-середовища запропонована модель може виконувати роль інтелектуального пошукового шару. Вона не обов’язково замінює наявні сховища документів, а інтегрується з ними через індексаційні конектори та API. Такий шар може підтримувати пошук аналогів, виявлення дублювання моделей, пошук деталей за функціональним призначенням, навігацію між варіантами конструкції, перевірку відповідності

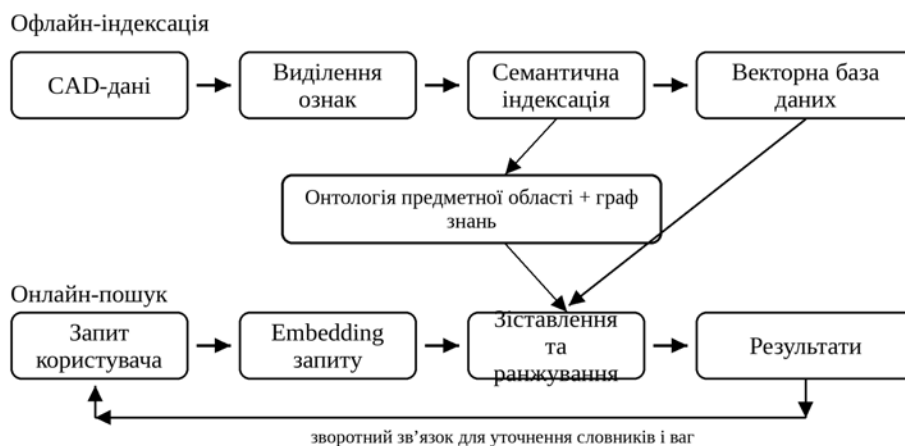


Рис. 1. Концептуальна архітектура системи пошуку CAD-даних

стандартним елементам і підготовку наборів даних для подальшого машинного навчання.

Під час практичної реалізації потрібно враховувати обмеження доступу до інженерних даних. CAD-файли можуть містити комерційно чутливу інформацію, тому індексація має підтримувати ролі користувачів, контроль прав доступу, журналювання запитів і механізми вилучення застарілих або конфіденційних версій. Векторна база даних і граф знань повинні зберігати посилання на оригінальні файли так, щоб результат пошуку не порушував політик безпеки підприємства.

Запропонована концептуальна модель не обмежується пошуком за готовою моделлю. Вона також може бути використана для підтримки ранніх стадій проєктування, коли користувач має лише приблизний функціональний опис або ескіз. У цьому випадку система виконує роль помічника, який пропонує наявні рішення, схожі конструктивні вузли або релевантні фрагменти знань. Такий сценарій особливо цінний для навчання молодих інженерів і для організацій, де частина досвіду зберігається не у формальних документах, а в архівах попередніх проєктів.

Отже, модель забезпечує перехід від файлового пошуку до пошуку в просторі інженерних знань. Її ключова ідея полягає в тому, що CAD-об'єкт одночасно індексується як геометрична структура, текстовий документ, набір атрибутів, семантичний вузол графа знань і вектор у просторі подібності. Саме поєднання цих подань створює основу для пошуку, орієнтованого на зміст, а не лише на збіг слів або зовнішню схожість форми.

Висновки. У статті запропоновано концептуальну модель пошукової системи в системах автоматизованого проєктування, яка поєднує семантичний пошук, онтологічне моделювання, граф знань і векторне подання інженерних даних. Модель спрямована на подолання обмежень традиційного пошуку за метаданими та ключовими словами, оскільки враховує геометричні, тополо-

гічні, атрибутивні й функціональні характеристики CAD-об'єктів.

Визначено основні компоненти архітектури: рівень джерел даних, модуль нормалізації, декомпозицію та виділення ознак, семантичну анотацію, онтологію предметної області, граф знань, формування векторних подань, векторну базу даних, інтерпретацію запиту, семантичне зіставлення та ранжування результатів. Показано, що ефективний пошук у CAD-архівах потребує гібридної логіки, у якій швидкодія векторного пошуку поєднується з пояснюваністю онтологічного та графового шару.

Окреслено принцип комбінованої релевантності, у межах якого результат оцінюється за сукупністю семантичної, геометричної, топологічної, текстової та метаданих-близькості. Наголошено, що вагові коефіцієнти такого оцінювання мають добиратися відповідно до предметної області й типу інженерних задач, а наведена формалізація має концептуальний, а не експериментально підтверджений характер.

Практичне значення запропонованої моделі полягає у створенні основи для інтелектуального пошукового шару, який може інтегруватися з CAD, PDM і PLM-системами, підтримувати повторне використання проєктних рішень, зменшувати дублювання моделей і полегшувати роботу з великими архівами інженерних даних. Модель також може бути корисною для побудови навчальних і виробничих сервісів, орієнтованих на доступ до накопиченого інженерного досвіду.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на реалізацію прототипу, формування тестового набору CAD-файлів, вибір і порівняння метрик подібності, розроблення онтології для конкретної галузі, експериментальне налаштування ваг релевантності та перевірку якості пошуку на текстових, графічних і комбінованих запитах. Окремим напрямом є дослідження пояснюваності результатів і механізмів керованого зворотного зв'язку користувача.

Список літератури:

1. Ning F., Shi Y., Tong X., Cai M., Xu W. A review and assessment of 3D CAD model retrieval in machine-part design. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2025. Vol. 38, No. 6. P. 752–774. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2382196>
2. Zhang C., Zhou G. A view-based 3D CAD model reuse framework enabling product lifecycle reuse. *Advances in Engineering Software*. 2019. Vol. 127. P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.09.001>
3. Lee H., Lee J., Kim H., Mun D. Dataset and method for deep learning-based reconstruction of 3D CAD models containing machining features for mechanical parts. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2022. Vol. 9, No. 1. P. 114–127. DOI: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab072>
4. Carvalho L. E. R., von Wangenheim A. 3D object recognition and classification: a systematic literature review. *Pattern Analysis and Applications*. 2019. Vol. 22, No. 4. P. 1243–1292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10044-019-00804-4>

5. Chen J., Ilies H. T., Ding C. Graph-Based Shape Analysis for Heterogeneous Geometric Datasets: Similarity, Retrieval and Substructure Matching. *Computer-Aided Design*. 2022. Vol. 143. Article 103125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103125>
6. Tao S., Wang S., Chen A. 3D CAD solid model retrieval based on region segmentation. *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 76, No. 1. P. 103–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3033-3>
7. Yeo C., Kim B. C., Cheon S., Lee J., Mun D. Machining feature recognition based on deep neural networks to support tight integration with 3D CAD systems. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 22147. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01313-3>
8. Meka S., Dowluru S., Dumpala L. Automatic Feature Recognition Techniques for the Integration of CAD and CAM: A Review. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 83–109. DOI: <https://doi.org/10.1520/SSMS20230016>
9. Nzetchou S., Durupt A., Remy S., Eynard B. Semantic Enrichment Approach for Low-Level CAD Models Managed in PLM Context: Literature Review and Research Prospect. *Computers in Industry*. 2022. Vol. 135. Article 103575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103575>
10. Ning F., Shi Y., Cai M., Xu W. Part machining feature recognition based on a deep learning method. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34. P. 809–821. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01827-7>
11. Fensel D., Şimşek U., Angele K., Huaman E., Kärle E., Panasiuk O., Toma I., Umbrich J., Wahler A. Knowledge Graphs: Methodology, Tools and Selected Use Cases. Cham: Springer, 2020. 148 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37439-6>

Korotkykh V.M. CONCEPTUAL MODEL OF A SEARCH SYSTEM IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

The article addresses the problem of organizing intelligent retrieval of engineering data in computer-aided design environments, where large collections of CAD files, drawings, specifications and accompanying attributes are accumulated throughout the product life cycle. It is shown that conventional search based on file names, authors, creation dates or isolated textual fields is not sufficient for high recall and relevance, because it does not capture the geometric structure, topological relations, functional purpose of elements and the context in which a design solution is used. The aim of the study is to formulate a conceptual model of a search system for CAD environments that combines semantic search, ontology-based modeling, a knowledge graph and vector representations of engineering data. The proposed model describes a coordinated sequence of stages: acquisition and normalization of CAD data, decomposition of models and drawings, extraction of geometric, topological and attribute features, creation of semantic annotations, generation of vector representations, indexing in a vector database, interpretation of the user query, semantic matching and ranking of results. Particular attention is paid to the role of the domain ontology, which defines a common vocabulary of concepts, properties and relations, and to the knowledge graph, which records links between models, parts, materials, technological operations, standards and product functions. Unlike approaches focused only on external shape similarity, the conceptual model is intended to take design intent into account and to support reuse of engineering solutions according to their meaning. The paper does not report experimental evaluation results; the proposed approach is considered as an architectural and methodological basis for further implementation of a prototype, selection of relevance metrics and validation on real CAD datasets. The practical significance of the model lies in creating prerequisites for reducing search time, decreasing duplication of design work, improving interoperability among CAD, PDM and PLM environments and supporting digital manufacturing under Industry 4.0 conditions.

Keywords: CAD, computer-aided design, semantic search, ontology, knowledge graph, vector representation, engineering data, design reuse.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026