

Приватний заклад вищої освіти

Одеський технологічний університет «ШАГ»

Кафедра інформаційних технологій та фундаментальної підготовки

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

зі спеціальності «122 Комп'ютерні науки»

**«ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ 3D-
МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ»**

Автор: Зеленова Катерина Павлівна

Керівник: Суліма Микола Миколайович

ВСТУП

У сучасному світі технологій тривимірне (3D) моделювання є ключовим етапом розробки виробів, архітектурних проектів та інженерних систем. Воно забезпечує візуалізацію, точність і оптимізацію процесів проектування, а також інтеграцію з сучасними методами виробництва, такими як 3D-друк та числове програмне керування (ЧПК).

З розвитком систем автоматизованого проектування (САПР) відбувся перехід від плоских креслень до повноцінних цифрових моделей об'єктів, які дозволяють не лише бачити кінцевий результат, а й проводити аналіз, симуляцію та оптимізацію конструкцій. Сучасні САПР-програми надають користувачам широкий спектр інструментів для створення 3D-моделей з різними методами: параметричним, прямим, твердотілим, поверхневим тощо.

Окремо слід зазначити тенденцію пришвидшення процесів моделювання, зокрема шляхом використання різноманітних методів моделювання та корекції моделей заснованих на штучному інтелекті, предикативних алгоритмах тощо.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю глибокого розуміння та обґрунтованого вибору методів моделювання залежно від задачі, галузі застосування, рівня складності проекту та доступного програмного забезпечення а також бажанням визначити можливості й ліміти існуючих САПР взагалі та інструментів пришвидшення моделювання зокрема.

Метою цієї роботи є дослідження сучасних методів 3D-моделювання, в тому числі інструментів автоматизації, які застосовуються в САПР, та визначення їх доцільності використання в різних практичних сценаріях. Необхідно порівняти їх особливості, переваги та обмеження, а також оцінити ефективність застосування в різних галузях інженерії та дизайну.

Для досягнення поставленої мети, напевно, слід обмежити дослідження наступними етапами:

- охарактеризувати основні методи 3D-моделювання;
- проаналізувати можливості сучасних САПР;
- реалізувати моделювання об'єкта з використанням різних методів;
- обрати критерії порівняння та провести порівняння за визначеними критеріями;
- зробити висновки та сформулювати рекомендації для майбутніх користувачів й подальшого розвитку напрямку.

Спираючись на окреслені напрямки можна виокремити конкретні завдання, які будуть вирішуватися в цій роботі:

- Провести огляд історії та розвитку 3D-моделювання в CAD-системах.
- Класифікувати основні методи 3D-моделювання (параметричне, пряме, поверхневе тощо).
- Проаналізувати сучасні CAD-програми, що реалізують ці методи (AutoCAD, Fusion 360, SolidWorks, FreeCAD тощо).
- Здійснити практичне моделювання об'єкта з використанням різних методів.
- Порівняти ефективність методів за критеріями: швидкість, зручність, точність, адаптивність до змін.
- Надати рекомендації щодо вибору методу відповідно до задачі проектування.

Окрему увагу слід приділити інструментам, що базуються на штучному інтелекті, нейромережах, породжуючому проектуванні, автоматизованому моделюванні, генеративному дизайні й іншим сучасним напрямкам.

Об'єктом дослідження є процес 3D-моделювання в середовищі САПР.

Предметом дослідження — методи побудови тривимірних моделей та особливості їх реалізації в сучасних програмних платформах.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ В САПР

Системи автоматизованого проектування (САПР) пропонують користувачам різноманітні методи створення тривимірних моделей, що суттєво відрізняються за принципами побудови, функціональністю та сценаріями застосування. Нижче подано аналіз основних методів 3D-моделювання, що використовуються в сучасних САПР.

В цьому розділі буде наведений генезис САПР, історія розвитку автоматизованого проектування в розтині 3D-моделювання, теоретичні засади 3D-моделювання, розглянуто методи моделювання, в тому числі й сучасні, виконано попереднє порівняння методів.

1.1 Огляд сучасних CAD-систем

З аналізу мережі та літератури відомо про наявність великої кількості так званих CAD/CAM/CAE-систем (CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing), та CAE (Computer-Aided Engineering)).

CAD або САПР - це системи, які допомагають інженерам створювати 3D-моделі, креслення та іншу конструкторську документацію. CAD-системи використовуються на ранніх етапах проектування, наприклад, для створення ескізів, моделювання деталей та складальних одиниць.

CAM (Computer-Aided Manufacturing) - це системи, що допомагають автоматизувати процес виробництва. Основне завдання CAM - підготовка програм для верстатів із ЧПУ, щоб обробляти деталі відповідно до 3D-моделі. CAM-системи використовуються на етапі виробництва, коли необхідно перевести 3D-модель у конкретну технологічну операцію.

CAE (Computer-Aided Engineering) - системи, які дозволяють проводити інженерні розрахунки та симуляції для аналізу фізичних процесів та властивостей матеріалів. CAE-системи використовуються для оцінки поведінки виробу в реальних умовах, наприклад, для аналізу напруги, теплопередачі або аеродинамічних характеристик.

Сучасне програмне забезпечення уособлює в собі усі з перерахованих визначень, тому надалі не буду робити відмінностей між CAD/CAM/CAE-системами та поєднаю їх під єдиним скороченням САПР - системи автоматизованого проектування.

САПР починають свій розвиток у кінці 50-х років, коли General Motors разом з МІТ створює першу комп'ютерну систему графічного проектування, а

першим CAD-застосунком став Sketchpad, створений у 1963у році, й дозволяв “малювати” об'єкти на екрані.

У 70-80х роках САПР створюються виключно для потреб військової, автомобільної та авіаційної промисловості й є, зазвичай, двовимірними. В цей час також зароджується 3D твердотільне моделювання.

Персональні комп'ютери, що почали поширюватися в 90-і роки призвели до переорієнтації САПР на потреби індивідуальних користувачів та малого бізнесу. Водночас з'являється AutoCAD (1982) - САПР, яка стала “законодавцем” індустрії. На цей період припадає реалізація в САПР параметричного моделювання що стає стандартом для створення 3D-моделей в промисловому дизайні.

Кінець 90-х, 2000-і та 2010-і роки стали роками інтеграції CAD/CAM/CAE в єдині програмні пакети, що є логічним, та подальший розвиток кожним розробником своєї єдиної цифрової інженерної екосистеми, які дозволяють виконувати не лише моделювання, а й симуляції, обчислення, програмування верстатів, управління проектами тощо, тобто відбувається втілення так званих систем “повного життєвого циклу” (PLM-системи, Product Lifecycle Management).

2010-2020 рр. в розвитку САПР визначаються орієнтацію на хмарні розрахунки та мобільне використання, і Fusion 360 став першою CAD/CAM/CAE-платформою з досить низьким порогом входу, що зробило його стандартом для масового користувача. А Onshape стає першою повністю браузерною САПР. Також в деяких САПР починають впроваджувати та розвивати генеративні алгоритми, використовувати нейромережі для автоматизації моделювання [1].

Сучасним етапом розвитку є продовження орієнтації на інтелектуалізацію САПР - використання алгоритмів генеративного дизайну, машинного навчання, автоматичної оптимізації конструкцій (рис.1.1).

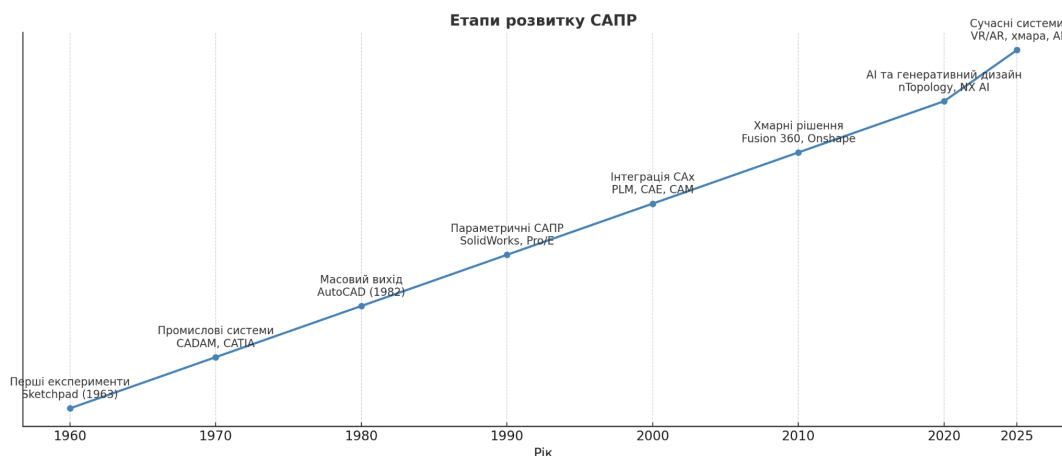


Рисунок 1.1 - Ключові етапи розвитку САПР

На сьогодні існує десятки або навіть сотні САПР, серед яких можна виділити декілька провідних, загальна інформація про них, що сформована [2] подана в таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 - Провідні САПР та їх особливості

Назва	Розробник	Тип	Особливості
AutoCAD	Autodesk	2D/3D	Класична САПР; переважно для креслень
SolidWorks	Dassault Systèmes	3D параметричне	Інженерний стандарт; простий у навчанні
Fusion 360	Autodesk	Все-в-одному	CAD+CAM+CAE; хмара; сучасний інтерфейс
Onshape	PTC	Хмарний CAD	Браузерна робота; реальна колаборація
CATIA	Dassault Systèmes	Високорівнева CAD	Аерокосмос, автомобілі; дуже складна
PTC Creo	PTC	Потужна CAD/PLM	Параметричне + вільне моделювання
Siemens NX	Siemens	Преміум CAD	Високотехнологічне проектування, PLM
FreeCAD	Відкрите ПЗ	Open-source	Безкоштовна альтернатива; модульна архітектура

1.2. Класифікація методів моделювання

Параметричне моделювання (Parametric Modeling) - базовий метод моделювання, побудова моделі починається зі встановлення параметрів (розміри, залежності, обмеження), й зміни параметра автоматично оновлюють всю модель. Застосовується для проектування деталей машин, корпусів, механізмів зі змінними розмірами в таких САПР як SolidWorks, Fusion 360, Autodesk Inventor, FreeCAD. До переваг можна віднести:

- Легке редагування;
- Точність і контроль геометрії;
- Можливість автоматизації та створення шаблонів.

В той же час даному методу моделювання притаманні наступні недоліки:

- потрібна ретельна логіка побудови;

- збільшується складність процесу пропорційно до зростання кількості параметрів.

Пряме моделювання (Direct Modeling) - переміщенням граней, ребер або поверхонь, без параметричних зв'язків тобто редагування геометрії напряму. Застосовується для швидкого створення концептуальних моделей, редагування імпортованих об'єктів (наприклад, STEP/IGES - файлів) в таких САПР як PTC Creo (в режимі Flexible Modeling), Siemens NX, SpaceClaim, Fusion 360 (Direct Mode). Таким чином перевагами прямого моделювання є: інтуїтивно зрозумілий процес, швидке внесення змін, зручно для редагування моделей без історії побудови. До недоліків можна віднести менше контрольованих змін та відсутність логіки параметричних залежностей.

Твердотільне моделювання (Solid Modeling), в парадигмі якого об'єкт описується як цілісне тіло з фізичними властивостями (об'єм, маса, центр ваги), й використовується для створення інженерних моделей для механічного аналізу, підготовки до виробництва, є базовим видом моделювання для подальшого цифрового виробництва, зокрема 3D-друку. Фізично коректне уявлення моделі, підтримка аналізу масових характеристик, сумісність із САМ-процесорами для виробництва - це переваги твердотільного моделювання, а до недоліків можна віднести меншу гнучкість при створенні складних органічних форм. Цей вид моделювання використовується в SolidWorks, CATIA, Fusion 360, Inventor [3].

Поверхневе моделювання (Surface Modeling) - побудова моделі на основі набору поверхонь, використовується для складної геометрії, де програє твердотільне моделювання, наприклад в автомобілебудуванні, дизайні складних корпусів, для аеродинамічних форм. Ультимативною перевагою є надзвичайно точне створення складних форм та гнучкість в редагуванні. В той же час трудомісткість та складність в освоєнні, разом з нефізичністю (немає маси, об'єму) що ускладнює конвертацію у тверде тіло є обмеженнями. Rhino, CATIA, Alias, SolidWorks (в розширеному режимі), Fusion360 (режим Surface) - програми, в яких є можливість використовувати поверхні [4].

Mesh-моделювання (Полігональне, в програмах типу Blender, ZBrush, Meshmixer) - різновид поверхневого моделювання, коли створюється як сітка з трикутників або багатокутників (полігонів). Застосовується здебільшого в комп'ютерній графіці та 3D-анімації, а саме в ігровій індустрії, для візуалізації, скульптурного моделювання, 3D-сканування. Перевагами є висока деталізація та анатомічність створених моделей, разом з цим не придатне для точного машинобудування та простого редагування що є недоліками.

Гібридне моделювання - комплексний різновид, що є поєднанням різних підходів (напр. параметричне + поверхневе + пряме) в одній моделі або середовищі, й може ефективно використовуватися для проєктів з високою

складністю: роботи, транспорт, архітектура, й підтримується в Fusion 360, Siemens NX, CATIA [5].

Узагальнюючи властивості розглянутих методів можна вказати, що

- параметричне моделювання найкраще підходить для технічних та інженерних задач;
- пряме моделювання зручне для швидкого створення прототипів і редагування;
- поверхневе моделювання незамінне у формотворчому дизайні.
- mesh-моделі використовуються переважно для візуалізації, ігор і сканованих об'єктів.
- гібридні середовища дають найбільшу гнучкість, особливо у складних задачах.

Порівняльна таблиця методів 3D-моделювання, що згенерована AI [2], лаконічно узагальнює огляд методів моделювання:

Таблиця 1.2 - Порівняння класичних методів 3D-моделювання

Метод	Принцип побудови	Переваги	Недоліки	Приклади програм	Основні галузі застосування
Параметричне	Геометрія залежить від параметрів та зв'язків	Точність, автоматичне оновлення, логіка побудови	Складність при великій кількості залежностей	Fusion 360, SolidWorks, FreeCAD	Машинобудування, інженерія
Пряме	Редагування геометрії без зв'язків	Швидке редагування, інтуїтивність	Відсутність історії, важко вносити складні зміни	SpaceClaim, PTC Creo, Fusion 360	Прототипування, редагування імпортів
Твердотільне	Повне тіло з фізичними властивостями	Об'єм, маса, аналіз, САМ-сумісність	Обмеження у формоутворенні	SolidWorks, Inventor, CATIA	Механообробка, виробництво, симуляція
Поверхневе	Модель складається з окремих поверхонь	Висока деталізація форм, точність	Важке освоєння, відсутність фізичних властивостей	Rhino, CATIA, Alias	Автодизайн, промисловий дизайн
Mesh	Сітка багатокутників	Деталізація, скульптурність, візуальність	Не придатне для точних обробок, складне редагування	Blender, Meshmixer, ZBrush	Ігри, 3D-сканування, візуалізація
Гібридне	Поєднання кількох методів	Максимальна гнучкість, комплексні проекти	Високі вимоги до програмного забезпечення	Siemens NX, Fusion 360, CATIA	Інжиніринг, аерокосмічна галузь, дронобудування

Табличне якісне представлення є ненаочним, тому пропоную графічне відображення результатів порівняння методів 3D-моделювання (рис.1.2).

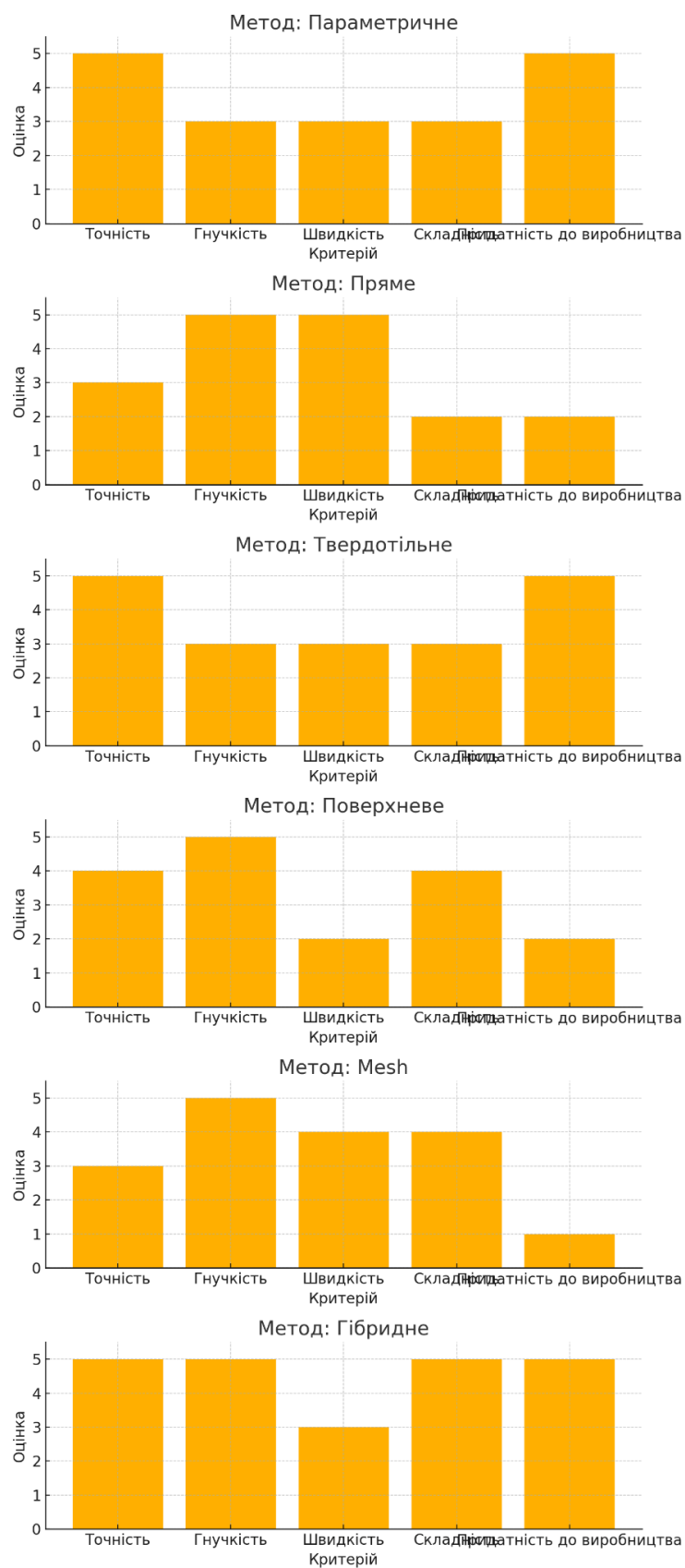


Рисунок 1.2 – Порівняння характеристик методів 3D-моделювання

Порівняння виконувалось за п'ятибальною шкалою (від 1 до 5, де 5 — найвищий показник) по наступних критеріям:

- точність;
- гнучкість;
- швидкість роботи;
- складність;
- придатність до подальшого виробництва.

Оцінка виконувалася на підставі власного досвіду використання різноманітних САПР.

Задля більш лаконічного відтворення результатів порівняння можна використовувати так звану «павутинну» діаграма (Radar Chart), яка наочно порівнює всі основні методи 3D-моделювання (рис. 1.3).

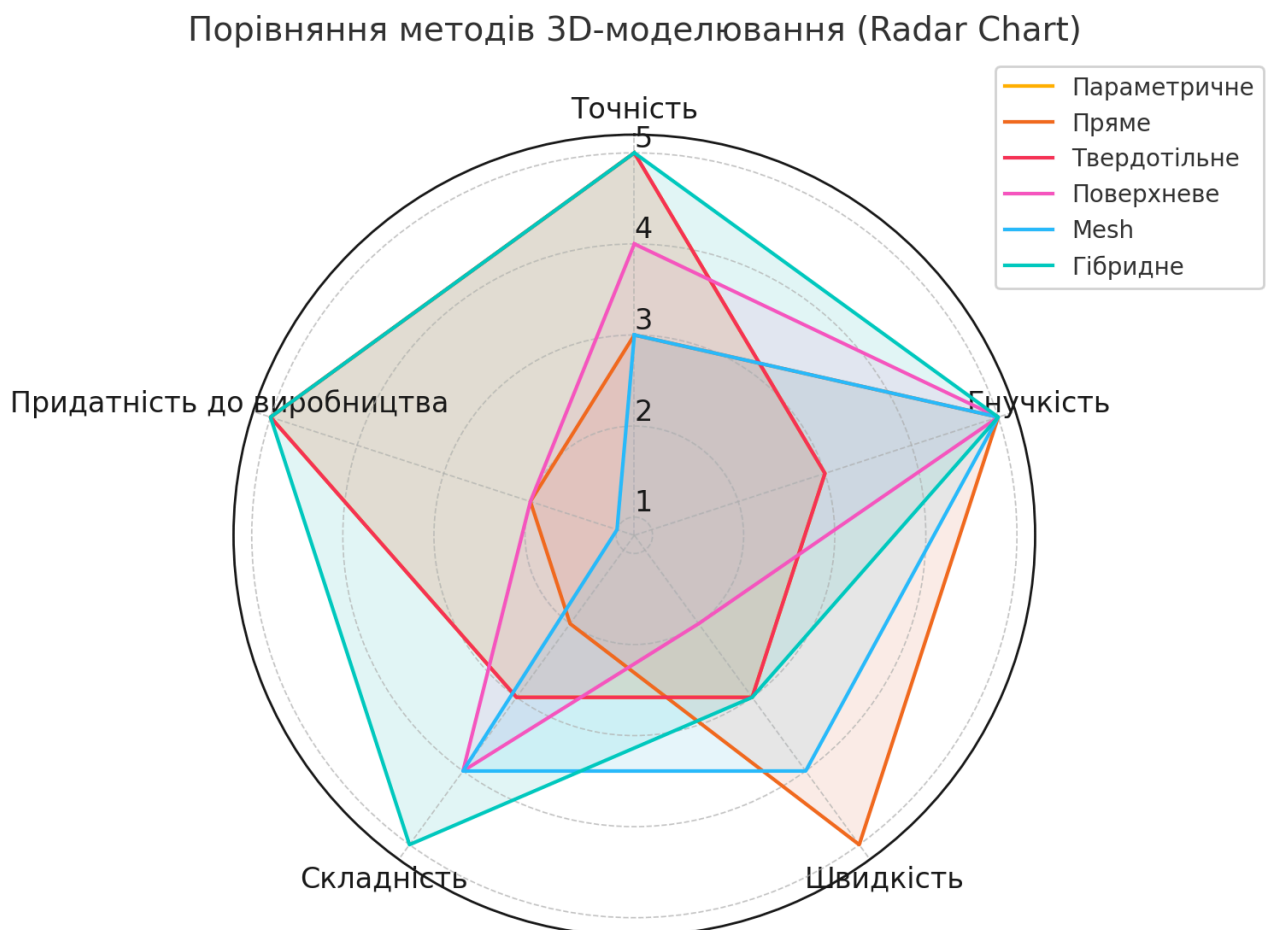


Рисунок 1.3 – Порівняльна «павутинна» діаграма методів 3D-моделювання

1.3 Сучасні методи моделювання

Generative Design від Autodesk - це модуль у Fusion 360, який дозволяє автоматично створювати варіанти моделей на основі введених параметрів,

обмежень і цілей без безпосереднього моделювання, й розроблений для оптимізації ваги, міцності, вартості та матеріалів з урахування технологій подальшого виробництва (3D-друк, фрезерування тощо). В якості початкових, вхідних даних від користувача вимагаються навантаження, точки кріплення, обмежуючі поверхні, матеріал, технологія виробництва. Після цього в хмарі відбувається створення десятків референсів, що задовольняють умовам разом за автоматичною топологічною оптимізацією. До особливостей відноситься специфічність створюваних форм, які не виникають у традиційному моделюванні, а самі форми більш “біологічні” ніж “синтетичні”. Єдиним суттєвим недоліком методу можна назвати складність редагування результатів моделювання без повторної генерації моделей [6].

Siemens NX AI (Smart Design with Artificial Intelligence) - один із найпотужніших CAD/PLM-пакетів. З 2019 року система активно вбудовує штучний інтелект і машинне навчання для автоматизації рутинних дій, поліпшення UX, і інтелектуальної допомоги інженеру, а до можливостей можна віднести:

- Predictive Engineering Analytics – на основі попередніх проєктів система прогнозує потенційні проблеми
- Command Prediction – NX запам’ятовує, які функції ви використовуєте, і пропонує їх у відповідному контексті
- Design Advisor – система виявляє “помилки” або конфлікти в конструкції (наприклад, при асемблюванні)
- Machine Learning для автоматизації моделювання – наприклад, автоматичне створення ребер жорсткості

Потужні можливості інструменти обумовлюють його високу ціну, що дає корпоративну орієнтацію, вимагає довготривалого навчання з експертами з CAE/ML, а також залежності від інших модулів від Siemens [7].

В Onshape немає повноцінного "AI-двигуна" чи генеративного дизайну як у Fusion 360 або Siemens NX AI, але є свої інструменти, які можуть наближатися до подібних рішень через інтеграцію та автоматизацію. У зв'язку з тим, що Onshape має відкриту екосистему, це дозволяє інтегрувати зовнішні програми через API або App Store, наприклад nTopology або Ansys nTop [8].

nTopology позиціонується як революційна система для інженерного проектування складних структур, що поєднує математичне моделювання, топологічну оптимізацію та інтуїтивну логіку побудови у вигляді графових вузлів (node-based interface). До основних функцій відносяться використання латіс-структур (решіток), градієнтні матеріали, функціональна оптимізація а також відбувається використання алгоритмічного дизайну. nTopology не

використовує класичну поверхневу геометрію, натомість об'єкти визначаються як функції, які описують форму, щільність, перфорацію тощо, що дозволяє без втрат геометрії змінювати параметри, масштабувати, комбінувати структури. Такий підхід є ефективним для створення неперервних, складних, органічних форм, які неможливо моделювати вручну.

Загальне порівняння методів виконане за допомогою [2] й подано в табл.1.3

Таблиця 1.3 - Сучасні методи 3Д-моделювання з використанням AI

Інструмент	Генеративний дизайн	AI / ML	Власна мова логіки	Хмарність
Onshape	Через інтеграції	Частково (логіка)	FeatureScript	Повністю хмарний
Fusion 360	Вбудований	Так	Ні	Частково хмарний
Siemens NX AI	Потужний	Справжній AI	Ні	Обмежена хмара
nTopology	Алгоритмічний	Частково	Node-based (граф)	Частково хмарний

2. МЕТОДИКА ПОРІВНЯННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЗД-МОДЕЛЮВАННЯ

Як показано в попередніх розділах роботи, САПР є складним та складеним програмним забезпеченням, виконувати повний аналіз функціоналу якого є складним самотійним завданням, що виходить за рамки дослідження що виконується. Вважаю за можливе провести суб'єктивний кількісно-якісний аналіз тих сучасних методів моделювання, що, по-перше, мають місце в складі розглянутих вище САПР, а також використовують в своїй основі штучний інтелект й призначені для автоматизації моделювання. В цьому розділі буде висвітлено процес розробки методики порівняння методів моделювання, вибір референсної моделі, надані результати порівняння.

2.1 Методика

Для проведення порівняльного аналізу слід встановити ті чи інші критерії порівняння, визначитись з методикою проведення аналізу та системами що порівнюються. Вважаю, що висування гіпотези щодо результатів порівняння для мого дослідження не має сенсу тому, що загальна мета полягає саме в результатах, а не підтвердженні чи спростуванні гіпотези.

Зазвичай, для порівняння САПР використовуються технічні, економічні та користувацькі критерії:

- продуктивність або швидкість моделювання, зручність модифікації створеної моделі;
- сумісність і адаптивність моделей та проектів, наприклад підтримка різних форматів файлів, інтеграції з іншим програмним забезпеченням;
- точність моделі й ресурсоемність її створення [9].

З практичної точки зору можна додати:

- навчальну складність, або витрати зусиль на навчання;
- наявність або відсутність підтримки параметризації процесу моделювання;
- можливості автоматичної генерації моделей;
- технологічність, тобто пристосованість створених моделей до подальшого виробництва [10].

Невід'ємною від критеріїв є сама методика порівняння, тому вважаю за необхідне привести її поміркований варіант перш ніж визначитись з конкретними критеріями.

В першу чергу слід обрати типовий об'єкт, який буде відтворюватися за допомогою різних САПР и відповідних методів що порівнюються. Зазвичай

такими об'єктами є функціональні елементи з промислового дизайну: кронштейни, корпуси або їх частини, несівні елементи, важилі, карабіни, тримачі тощо. Аналіз мережі й проектів, інтегрованих в САПР в якості прикладів дозволяє однозначно стверджувати, що здебільшого використовуються елементи, що призначені для з'єднання між собою інших елементів, мають витримувати навантаження в різних вимірах, мають відносно складну форму зі змінним перетином, отвори, виступи, заокруглення, фаски (рис. 2.1).

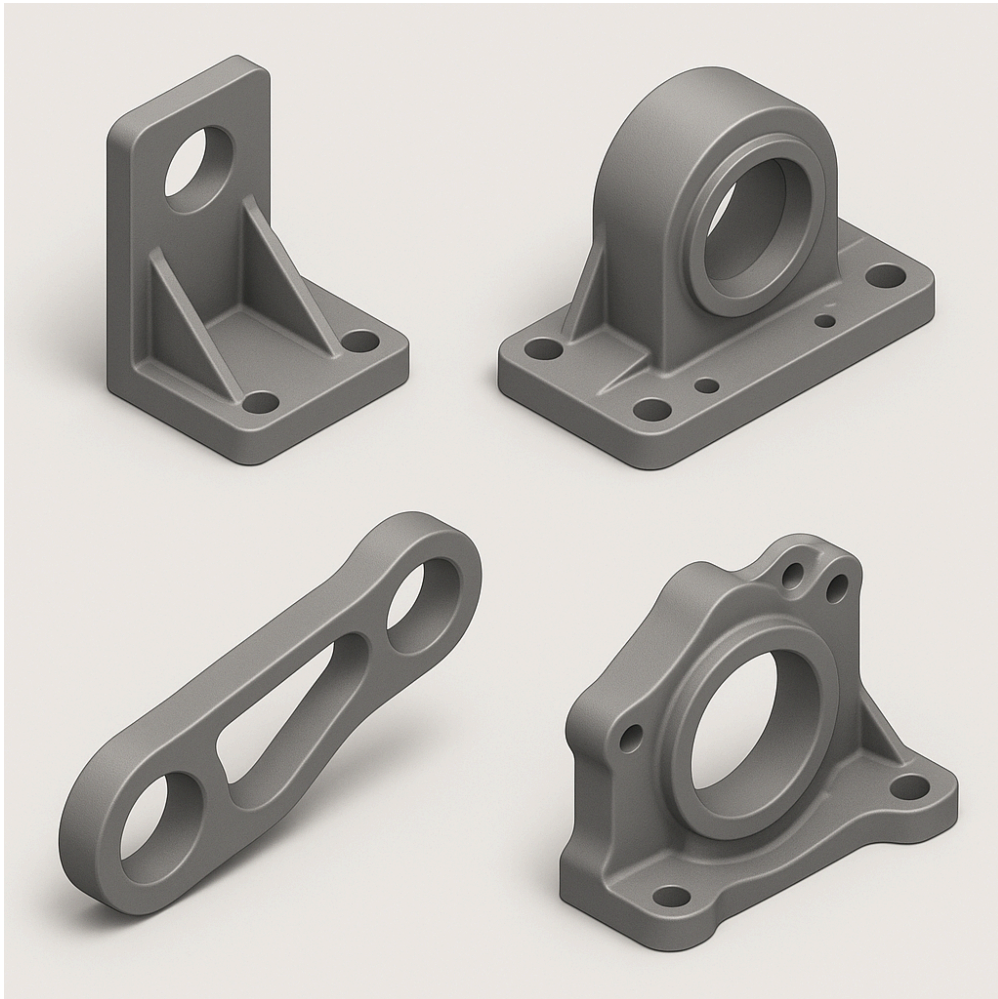


Рисунок 2.1 - Приклади об'єктів, які можуть бути референсом при порівнянні САПР

Обраний складний об'єкт слід змодельовати за допомогою різних САПР та методів моделювання які порівнюються з одночасною фіксацією великої кількості параметрів, тобто збору конкретної інформації про кількісні та якісні показники моделювання. До кількісних показників можна, в першу чергу, віднести час витрачений на моделювання, ресурсоемність програмного забезпечення, наприклад у відсотках завантаження обчислювальної системи,

кількість дій під час моделювання, цільові показники моделі тощо. Корисним також буде якісна оцінка, яка виконується суб'єктивно, наприклад зручність використання, простота навчання, додаткові інструменти - асистенти, прискорювачі тощо.

Для якісних показників корисно створити опитувальник або взагалі проводити суб'єктивно-статистичну експертизу, коли експертну оцінку дає група респондентів.

У зв'язку з тим, що розроблювана методика буде, в першу чергу, використовуватися для методів моделювання на кшталт генеративного дизайну та алгоритмів оптимізації корисним буде додати критерії з оцінки саме цих функціональних можливостей, наприклад різноманітність згенерованих варіантів моделі, кількість параметрів, за яким може відбуватися оптимізація або задаватися умови генерації, можливість впливу на алгоритм генерації, наприклад зміну базових структур, що будуть покладені в основу моделі.

Отримані результати слід звести в узагальнюючу таблицю, а для наочності корисно використовувати графіки і діаграми. Графічне представлення забезпечує чітке наочне відображення переваг та недоліків, яке сприймається швидко та однозначно.

У зв'язку зі складністю САПР, різноманітністю методів моделювання, бажання всебічного аналізу з однієї сторони й спрощення використання методики та результатів з іншої, вважаю за оптимальне використання наступних десяти критеріїв (табл.2.1):

Таблиця 2.1 - Критерії для порівняння сучасних методів моделювання в САПР

№	Критерій	Опис	Одиниця вимірювання / Тип оцінки
1	Час моделювання	Скільки часу потрібно для створення базової моделі	Хвилини
2	Гнучкість редагування	Наскільки легко вносити зміни в модель	Балова шкала (1–10) або рівень (низький–високий)
3	Складність навчання	Наскільки складно опанувати метод для новачка	Рівень: легка / середня / складна
4	Автоматизація / оптимізація	Чи можливо автоматизувати зміни або оптимізувати модель	Так / Ні або Балова шкала (1–10)

5	Якість геометрії / точність	Наскільки точно можливо відтворити об'єкт	мм або % похибки
6	Системні вимоги	Ресурси, необхідні для стабільної роботи	Гігабайти ОЗУ, кількість ядер CPU
7	Сумісність з іншими CAD/CAM/CAE системами	Чи легко експортувати моделі в інші системи	Так / Ні або форматів підтримки
8	Візуальна складність форм	Наскільки складні та органічні форми можна створити	Приклад моделі / рівень: простий–складний
9	Можливість параметризації	Чи підтримує параметри і змінні	Так / Ні
10	Результат оптимізації (тільки для генеративного дизайну)	Економія ваги, підвищення міцності, мінімізація витрат матеріалу	% зменшення ваги / кількість варіантів

Для більш точного порівняння між собою саме автоматизованих методів моделювання корисним буде використання додаткової таблиці критеріїв:

Таблиця 2.2 - Додаткові критерії порівняння

№	Критерій	Опис	Одиниця вимірювання / Тип оцінки
11	Різноманітність згенерованих варіантів	Оцінка варіативності генеративних алгоритмів	одиниці
12	Кількість параметрів оптимізації	Оцінка можливості впливу на алгоритми, параметризація	одиниці
13	Варіанти умов генерації	Кількість цільових показників що задаються на етапі конфігурування	одиниці
14	Можливість впливу на алгоритм (структури)	Наявність вибору типу структур, можливість впливу на ітерації	так/ні, ступінь впливу, наприклад кількість варіативних параметрів

2.2 Вибір моделі для виконання в САПР

Як було вказано вище, в якості референсної моделі для порівняльного аналізу слід обрати типовий інженерний об'єкт, що має складну геометрію. Також логічним буде врахування можливості моделювання такого об'єкту не лише параметрично або поверхнево, а й генеративно.

Розповсюдженим варіантом референсної моделі є кронштейн, як елемент з'єднання площин з отворами під елементи кріплення до з'єднувальних поверхонь. Такий компонент є простим для параметричного моделювання, может бути швидко створений та оптимізований шляхом генеративного дизайну або за допомогою автоматизованого моделювання. Іншим, більш складним варіантом кронштейну для кріплення стрижня до площини (рис. 2.2)

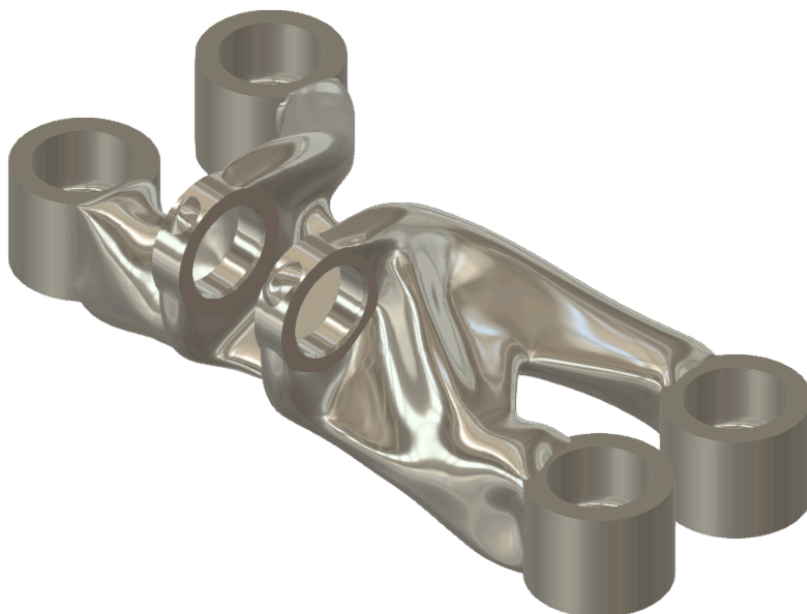


Рисунок .2.2 - Приклад кронштейну

Для демонстрації можливостей сучасних методів імітаційного моделювання в САПР часто використовують моделі тіл обертання, наприклад корпуси підшипників, що знаходяться під впливом навантажень у різних напрямках, мають симетричні форми та порожнини, вимагають точності в геометрії, дозволяють використання поверхневого моделювання для обтічних форм.

Різноманітні важелі, плечі, секції та балки, особливо призначені для рухомих механізмів також можна розглядати як референсні моделі, особливостями яких є загальна геометрія витягнутої балки з отворами, а цільовим показником при оптимізації зазвичай стає мінімізація маси шляхом

використання вирізок, отворів, складної форми, тощо. Моделювання таких елементів может бути як прямим так і генеративним.

Корпуса та їх частини, особливо зі змінним перетином що досить часто зустрічається в автомобіле- та верстатобудуванні є, на мою думку, занадто складними та слабо передбачуваними моделями, однак завдяки можливості відтворення поверхневим методом також мають право виступати у ролі референса.

Загальні особливості зазначених моделей подані в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 - Відмінності можливих референсних моделей

Об'єкт	Опис	Відмінності
Кронштейн	L-подібна деталь з круглими отворами і ребрами жорсткості	Прості форми + ребра + фаски
Корпус підшипника	Циліндр у коробці з круглими вирізами і технологічними отворами	Параметричність + симетрія
Важіль	Витягнута S-подібна форма з пустотами і отворами	Ідеальний для генерації топології
Кришка редуктора	Складна плоска деталь з фланцем і посадками	Комбінація поверхневого й параметричного
Оптимізована рама	Асиметрична, біонічна структура з отворами	Тільки генеративний дизайн

Спираючись на викладені вище відомості, а також бажання мінімізувати кількість референсних моделей й час на їх моделювання, разом з намаганням задіяти усі методи моделювання, можна висунути загальні вимоги до універсальної референсної моделі для порівняння САПР та методів моделювання в них:

- модель має бути середньою за рівнем складності побудови, щоб отримувати оптимальну за точністю кількісну характеристику складності й не бути занадто вимогливою до навиків оператора;
- мати комбіновану геометрію, а саме бути поєднанням тіл обертань та площин, мати отвори та вирізи нетривіальних форми;
- бути розповсюдженою в усіх трьох площинах простору, задля
- мати симетрію, що повинно спростити процес її створення в різних САПР;
- бути фізичною, тобто мати кінцеве практичне призначення;

- бути реалізованою або технологічною, тобто мати можливість досить простого відтворення в реальності сучасними технологіями, наприклад 3Д-друку;
- бути потенційно генеративною, тобто мати засади не лише для прямого моделювання, а й для моделювання шляхом завдання умов та з використанням породжуючих алгоритмів.

На мою думку найкраще відповідає зазначеним вимогам модель, що вирішує завдання кріплення горизонтальної площини, наприклад полиці, до вертикальних поверхонь, наприклад стін, але з умовою, що вертикальні поверхні утворюють між собою кут. Таким чином референсна модель є складним або L^2 - кронштейном, що має точки кріплення в усіх трьох площинах, а задля ускладнення геометрії повинна мати додаткові ребра жорсткості, вирізи, фаски. Приклад найпростішого варіанта можливої моделі поданий на рис.2.3:

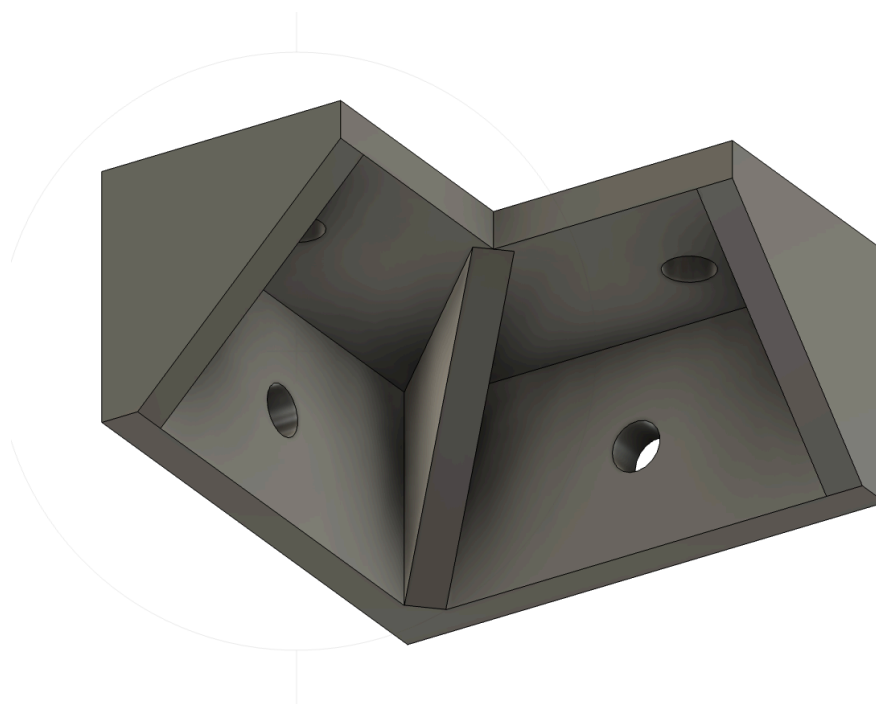


Рисунок 2.3 - Універсальна референсна модель “ L^2 - кронштейн”

2.3 Результати порівняння

За запропонованою методикою разом з використанням L^2 -кронштейгну у якості референса було виконано порівняння сучасних методів моделювання у різних САПР, зокрема SolidWorks, Fusion 360, Onshape тощо. Результати порівняння подано в таблиці 2.4:

Таблиця 2.4 - Порівняння сучасних методів моделювання в САПР

Критерій	Fusion 360	SolidWorks	Onshape	FreeCAD
Час моделювання (зручність, швидкість)	9	8	7	5
Гнучкість редагування (історія, параметрика)	9	10	8	6
Складність навчання	8	6	7	4
Автоматизація / оптимізація	9 (generative design, AI tools)	7 (manual + Add-ins)	5	4
Якість геометрії / точність побудови	9	10	8	6
Системні вимоги	7 (десктоп + хмара)	6 (вимогливий)	9 (браузерна)	6
Сумісність з іншими CAD/CAM/CAE системами	9 (STEP, IGES, STL, DXF...)	10	8	7
Візуальна складність форм (складна геометрія)	9	10	7	6
Можливість параметризації	9	10	8	6
Результат оптимізації (генеративний дизайн)	9 (автогенерація + варіативність)	6 (через надбудови)	4	4 (частково вручну)

Графічне відображення порівняння методів за основними критеріями подано на рис. 2.4:

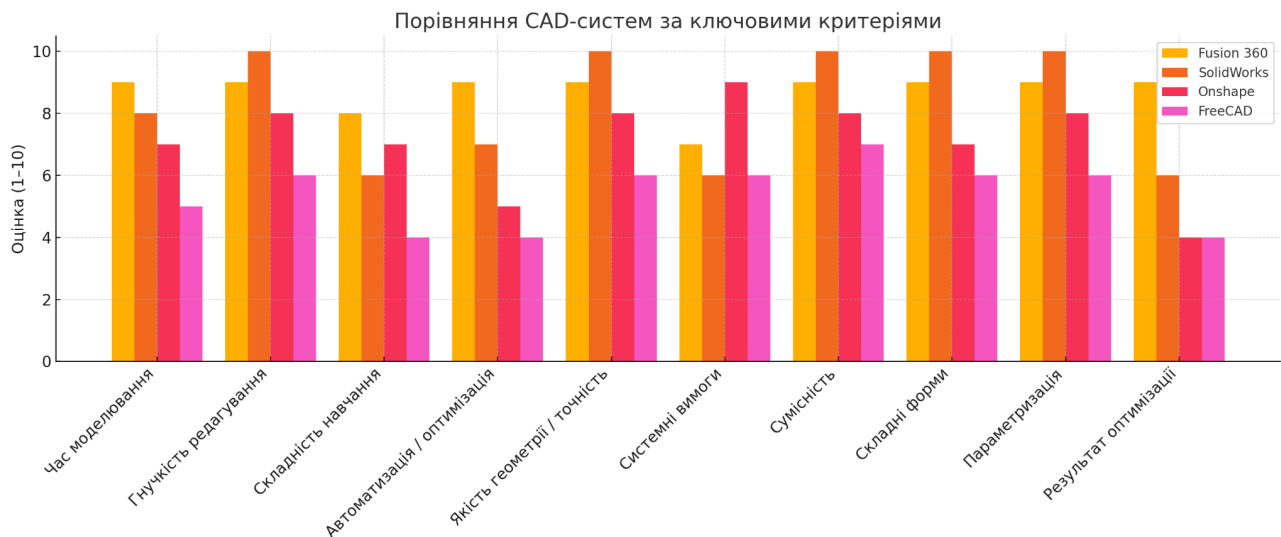


Рисунок 2.4 - Порівняння за основними критеріями

В роботі також виконано порівняльний аналіз за додатковим переліком критеріїв, результати якого подано в табл. 2.5 та на рис.2.5

Таблиця 2.5 - Порівняння сучасних методів моделювання в САПР за додатковими критеріями

Критерій / САПР	Fusion 360	SolidWorks	Onshape	FreeCAD
Різноманітність згенерованих варіантів	8 (Generative Design)	6 (через надбудови)	4	3
Кількість параметрів оптимізації	8	7	5	3
Варіанти умов генерації	9	7	4	3
Можливість впливу на алгоритм (структури)	7	6	4	5

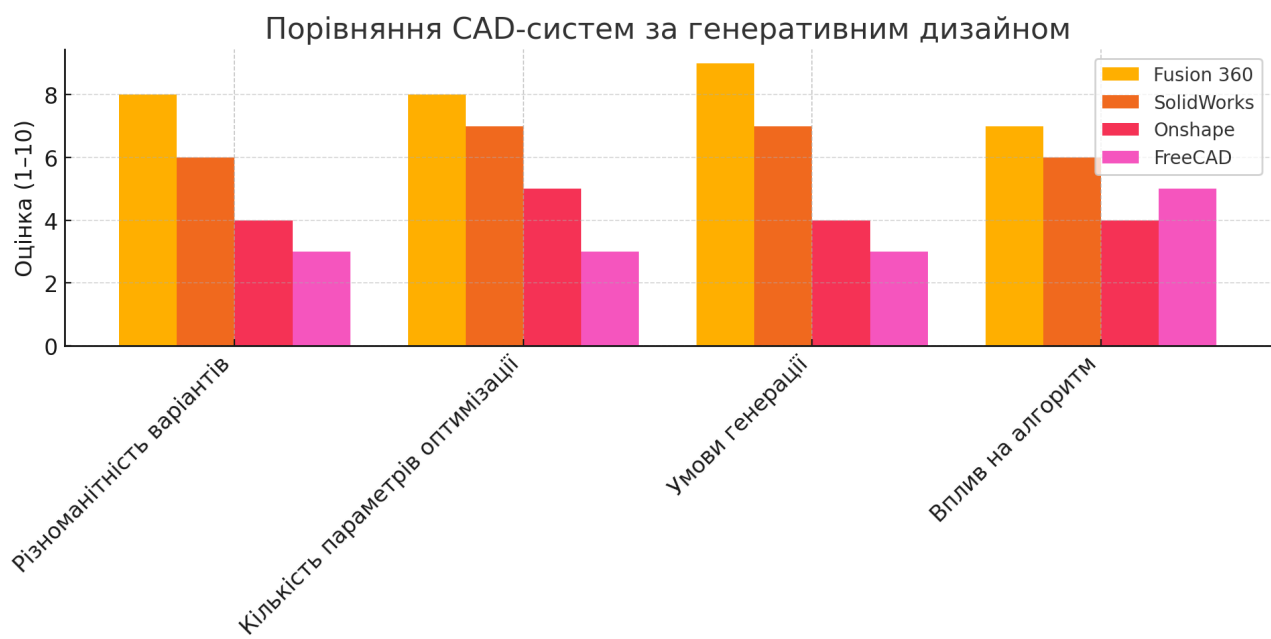


Рисунок 2.5 - Порівняння сучасних методів моделювання в САПР за додатковими критеріями

ВИСНОВКИ

Вважаю, що до основних загальних досягнень мого дослідження можна віднести:

- проведення огляду можливостей сучасних САПР, а саме методів автоматизації 3Д-моделювання;
- виконання порівняння загальних переваг та недоліків в основних методах моделювання таких САПР як Fusion360, SolidWorks, Onshape та інші;
- розробку методики для проведення кількісно-якісного порівняльного аналізу методів 3Д-моделювання, призначених для автоматизації процесу моделювання;
- отримання конкретних результатів порівняння САПР за комплексом критеріїв, визначення умов та рекомендацій щодо використання того чи іншого методу у складі тієї чи іншої САПР для вирішення конкретного завдання.

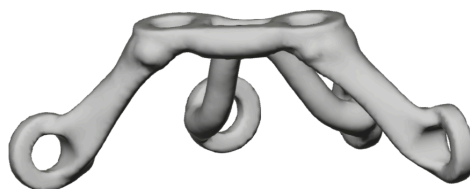
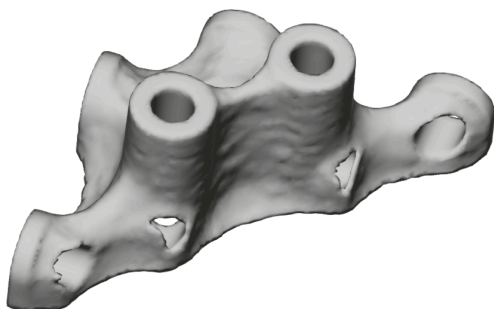
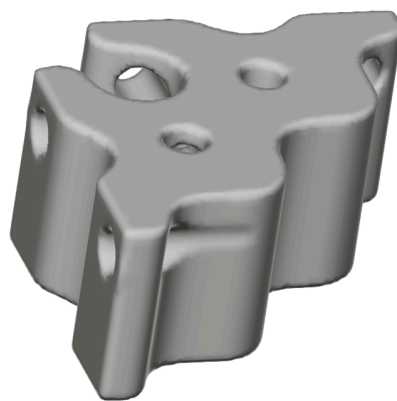
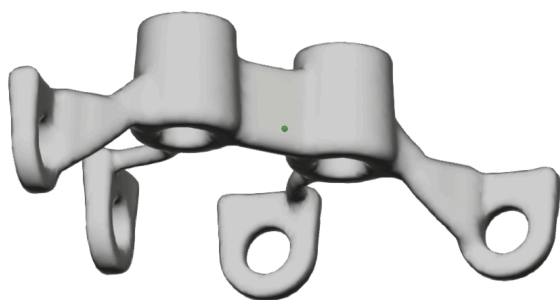
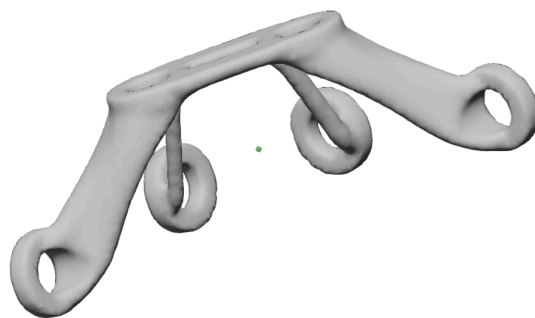
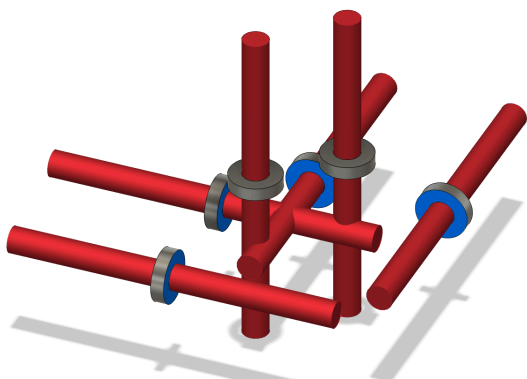
У якості подальшого розвитку в цьому напрямку можна запропонувати логічне уточнення, розширення або, навпаки, звуження критеріїв та удосконалення методики порівняння, а також дослідження за її допомогою такого сучасного методу 3Д-моделювання як конвергентне моделювання. Корисним буде створити групи критеріїв з ваговими коефіцієнтами для кожної групи, додати критерії щодо користувацького досвіду, зокрема підтримки різних засобів взаємодії з середовищем САПР (наприклад, сенсорних екранів, графічних планшетів, стилусів, 3Д-маніпуляторів тощо). Вважаю корисним виокремити декілька суттєвих та взірцевих критеріїв для проведення експрес-оцінки методів моделювання, що може бути корисним для тестування оновлень в програмному забезпеченні САПР.

ЛІТЕРАТУРА

1. Звягінцев В. І. «Системи автоматизованого проектування: навч. посібник». – Київ: КНЕУ, 2020.
2. Зеленова К.П. Запити за напрямком CAD-систем [Електронний ресурс] / К.П. Зеленова // *ChatGPT OpenAI*. – 2025. – Режим доступу: <https://chat.openai.com>
3. Autodesk Fusion 360 – Overview and Capabilities [Електронний ресурс] // *Autodesk*. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
4. Dassault Systèmes SolidWorks – Product Page [Електронний ресурс] // *SolidWorks Official Website*. – Режим доступу: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>
5. Onshape – CAD Features Overview [Електронний ресурс] // *Onshape*. – Режим доступу: <https://www.onshape.com/en/features>.
6. Fusion 360 vs FreeCAD – Software Comparison [Електронний ресурс] // *Xometry Resources*. – Режим доступу: <https://www.xometry.com/resources/software/fusion-360-vs-freecad/>
7. Fusion 360 vs SolidWorks – Which CAD is Better? [Електронний ресурс] // *All3DP*. – Режим доступу: <https://all3dp.com/1/fusion-360-vs-solidworks-cad-software-comparison/>
8. Fusion 360 vs Onshape – Cloud CAD Compared [Електронний ресурс] // *All3DP*. – Режим доступу: <https://all3dp.com/1/fusion-360-vs-onshape-cloud-cad-software/>
9. Мірошник М.А. Системи автоматизації проектування пристроїв і систем автоматики. Основи систем автоматизації проектування: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – 102 с
10. Leu, Ming & Tao, Wenjin & Armani, Amir & Kolan, Krishna. (2017). NX 12 for Engineering Design. – Режим доступу: <https://me5763.github.io/lab/assets/books/NX-12-for-Engineering-Design.pdf>

ДОДАТОК А

Варіанти моделювання L²-кронштейну за допомогою генеративного дизайну



ДОДАТОК Б

Варіанти моделювання L^2 -кронштейну за допомогою автоматизованого моделювання

