

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
“РЕВЕРСНА ІЖЕНЕРІЯ”

для здобувачів освіти
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти,

спеціальностей: G11 Машинобудування,
G9 Прикладна механіка,
G12 Авіаційна та ракетно-космічна техніка
усіх освітніх програм та форм навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Реверсна інженерія» для здобувачів освіти за другим (магістерським) рівнем вищої освіти, спеціальностей: G11 Машинобудування, G9 Прикладна механіка, G12 Авіаційна та ракетно-космічна техніка усіх освітніх програм та форм навчання / Укл.: С.В. Танченко, М.В. Фролов, – НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 42 с.

Укладачі: С.В. Танченко, ст. викладач
М.В. Фролов, доцент, к.т.н.

Рецензенти: В.В. Солоха, доц., к.т.н

Відповідальний за випуск:, зав. лаб. В.П. Загородній

Затвердженона засіданні кафедри
“Металорізальні верстати та інструмент”

Протокол № 1.
від “21” __08__ 2025

Рекомендовано
до видання НМК
Машинобудівного факультету

Протокол № 1.
від “26” __08__ 2025

ЗМІСТ

	С.
ТЕМА 1. ОСНОВИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ	4
1.1 Поняття та визначення	4
1.2 Історичні передумови та розвиток реверсної інженерії	5
1.3. Напрями та галузі застосування реверсної інженерії.....	8
ТЕМА 2. ГЕОМЕТРИЧНІ ОСНОВИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ	9
2.1. Основні типи геометричних моделей	9
2.2 Основні методи побудови геометричних моделей	11
2.3 Інтеграція систем CAD та CAE	13
ТЕМА 3. РОБОТА З ДАНИМИ СКАНУВАННЯ.....	14
3.1 Обробка хмар точок.....	19
ТЕМА 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ	22
ТЕМА 5. ТОПОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ 3D-МОДЕЛЕЙ	25
5.1 Методи апроксимації та інтерполяції даних	28
РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ПЕРЕВІРКИ ДАНИХ.....	30
6.1 Порівняння моделі з еталонними даними	31
6.2. Методи метрологічного контролю.....	32
6.3. Тестування функціональних властивостей	35
6.4. Валідація у віртуальних середовищах	37
ТЕМА 7. НОРМАТИВНА ТА ПРАВОВА БАЗА ПРИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ	39
7.1 Авторське право та патентні обмеження.....	40
7.2. Етичні аспекти	41
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	42

ТЕМА 1. ОСНОВИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ

1.1 Поняття та визначення

Термін **"реверсна інженерія"** (*Reverse Engineering*) походить від англійських слів *reverse* – «зворотний» та *engineering* – «інженерія, технічна діяльність».

У широкому розумінні це **процес відновлення інформації про існуючий об'єкт, шляхом його дослідження, аналізу та побудови нової моделі.**

У вузькому інженерному сенсі реверсна інженерія – це **процес створення технічної документації, креслень, 3D-моделей і навіть повноцінних виробів на основі реального фізичного об'єкта, для якого первинні дані відсутні або недоступні.**

Основні ознаки реверсної інженерії:

–Послідовність процесу (Рис. 1):

- а) Вибір об'єкта та постановка задачі.
- б) Збір даних (контактні вимірювання, 3D-сканування, фотограмметрія, томографія).
- в) Обробка даних (очищення, вирівнювання, побудова поверхонь).
- г) Створення CAD-моделі.
- д) Перевірка та верифікація отриманої моделі.
- е) Використання результатів: створення креслень, виробництво нових деталей, оптимізація, 3D-друк тощо.



Рисунок 1.1 - Послідовність процесу реверсної інженерії

– Використання сучасних цифрових технологій – обов’язковим елементом є застосування CAD/CAE/CAM систем, 3D-сканерів, програм для обробки хмар точок.

– Орієнтація на відтворення властивостей об’єкта – як геометричних (форма, розміри), так і функціональних (міцність, рухи, принцип дії).

– Інтердисциплінарність – поєднання знань з машинобудування, інформатики, метрології, обчислювальної геометрії, медицини тощо.

Таким чином, реверсна інженерія — це не лише **технологія копіювання, а повноцінний науково-інженерний процес**, спрямований на отримання нових знань про об’єкт.

Приклади практичного значення процесу:

– У машинобудуванні: відтворення запасної частини для старого верстата, креслення якої втрачено.

– В автомобілебудуванні: сканування кузова для створення аеродинамічних обвісів.

– У медицині: побудова індивідуального імпланта на основі даних комп’ютерної томографії.

– У культурній спадщині: цифрова реконструкція скульптури чи архітектурної деталі.

1.2 Історичні передумови та розвиток реверсної інженерії

Ідея реверсної інженерії не є новою, протягом всієї історії людство намагалось відтворювати чужі вироби та технології. В різні часи процес реверсної інженерії використовувався для різних цілей.

Античність

Давньогрецькі та римські інженери вивчали військові машини противників (катапульти, тарани) і вдосконалювали їх для власних армій. Відомо, що римляни активно переймали технології будівництва кораблів у фінікійців і греків.

Середньовіччя

Європейські ремісники часто відтворювали східні вироби — від дамаської сталі до паперу. Наприклад, після захоплення арабських майстерень у XIII ст. у Європі поширюється виробництво паперу за східною технологією.

У цей період реверсна інженерія ще не мала наукової основи — це було ремісниче копіювання через спостереження, розбирання і спроби повторити техніку вручну.

Новий час (XVII–XIX ст.)

З розвитком машинобудування і промисловості виникла потреба не тільки у створенні нових машин, але й у **відновленні документації та креслень**.

XVII–XVIII ст.

У добу механіки та парових машин інженери часто мали справу з механізмами, які потрібно було розібрати, виміряти та відтворити. Наприклад, у Нідерландах та Британії активно копіювали конструкції водяних та вітряних млинів, а у Франції — годинникові механізми.

XIX ст. (індустріальна революція)

- Поширюється практика ремонту та модернізації парових двигунів і залізничних локомотивів на основі «розбирання» конкурентних виробів.
- Формується **інженерна метрологія** — як основа для точного відтворення розмірів і форм деталей.
- У військовій справі активно досліджувалися трофейні зразки зброї (наприклад, артилерія чи нарізні рушниці).

У цей час реверсна інженерія починає набувати наукового підґрунтя: вимірювання стають більш точними, використовуються креслярські стандарти.

XX століття: становлення як інженерної дисципліни

Початок XX ст.

- Розвиток автомобілебудування: компанії часто аналізували вироби конкурентів для вдосконалення власних моделей.
- У авіації копіювали конструкції літаків і двигунів. Наприклад, американські компанії вивчали французькі та німецькі літаки часів Першої світової війни.

Друга світова війна (1939–1945)

Реверсна інженерія стає масовим явищем у військово-промисловому комплексі. Відомий приклад — дослідження радянськими інженерами трофейного німецького літака *Messerschmitt Me 262*, першого серійного реактивного винищувача. У США вивчали японську техніку, а в Німеччині — британські радари. Процес включав розбирання, вимірювання, створення креслень і відтворення технології виробництва.

Холодна війна (1945–1991)

Реверсна інженерія активно використовувалася у військовій сфері: ракетобудування, електроніка, авіація. Відомий приклад — відтворення американських літаків **B-29 Superfortress**, які здійснили аварійні посадки у СРСР (1944). На їх основі було створено радянський літак Ту-4. У цивільній промисловості: копіювання побутової техніки, автомобілів, верстатів.

Кінець XX ст. (1980–1990-ті)

- Поява перших 3D-сканерів, заснованих на лазерних і оптичних методах.
- Активне впровадження **CAD/CAM/CAE систем** (AutoCAD, CATIA, Pro/ENGINEER), які дозволяли відновлювати 3D-моделі з фізичних об'єктів.
- Реверсна інженерія починає застосовуватися не лише у військовій, а й у цивільній промисловості: авіабудуванні, машинобудуванні, медицині.

XXI століття: цифрова епоха реверсної інженерії

Сучасний розвиток реверсної інженерії пов'язаний з інтеграцією цифрових технологій. Розглянемо основні етапи:

2000-ні рр.

- Розвиток високоточних **лазерних і структурованих 3D-сканерів**.
- Поширення програм для обробки хмар точок (Geomagic, Rapidform, MeshLab).
- Інтеграція результатів у CAD/CAE-системи.

2010-ті рр.

- Поєднання реверсної інженерії з **3D-друком** (additive manufacturing).
- Використання КТ (комп'ютерної томографії) у медицині для створення імплантів і протезів.
- Застосування фотограмметрії для архітектурної спадщини.
- Поява концепції **цифрового двійника** (*Digital Twin*), де реверсна інженерія є одним з ключових етапів.

2020-ті рр.

- Використання **штучного інтелекту** для автоматичної обробки хмар точок і побудови CAD-моделей.
- Масове застосування у **біоінженерії** (3D-моделі органів, індивідуальні імпланти).
- Використання у сфері **AR/VR** (доповненої та віртуальної реальності) для відтворення об'єктів у цифрових середовищах.
- Інтеграція в концепцію **Індустрія 4.0**: реверсна інженерія стає частиною автоматизованого циклу «виріб ↔ цифровий двійник ↔ виробництво».

1.3. Напрями та галузі застосування реверсної інженерії

Реверсна інженерія поділяється на кілька основних напрямів, кожен із яких спеціалізується на певних об'єктах та завданнях. Така класифікація допомагає однозначно визначити відповідні методи, інструменти та сфери застосування, роблячи процес реверсного інжинірингу більш ефективним та структурованим.

1. Механічна реверсна інженерія спрямована на відтворення геометрії деталей, вузлів і складних механізмів.

–**Основні завдання:** відновлення зношених або знятих з виробництва деталей; модернізація старих верстатів та машин; аналіз зношення та оптимізація конструкцій.

–**Методи:** контактне та безконтактне 3D-сканування, фотограмметрія, обробка хмар точок і створення CAD-моделей.

–**Галузі застосування:** машинобудування, конструювання інструменту, енергетика.

2. Електронна реверсна інженерія спрямована на аналіз електронних компонентів, схем та програмного забезпечення, що їх керує.

–**Основні завдання:** дослідження та повторне створення електронних плат; відновлення документації для застарілих пристроїв; контроль якості та оптимізація електронних систем.

–**Методи:** сканування та аналіз плат, розбір схем, тестування сигналів, відтворення PCB у CAD-системах.

–**Галузі застосування:** телекомунікації, авіаційна та автомобільна електроніка, оборонна промисловість.

3. Програмна реверсна інженерія полягає у вивченні програмних продуктів для аналізу їх логіки, структури та алгоритмів роботи.

–**Основні завдання:** відновлення алгоритмів без наявних вихідних кодів; аналіз безпеки та пошук вразливостей; підтримка старого програмного забезпечення.

–**Методи:** дизасемблювання, декомпіляція, статичний та динамічний аналіз програм, використання спеціалізованого ПЗ для реверсу (IDA Pro, Ghidra).

–**Галузі застосування:** ІТ, кібербезпека, промислове ПЗ, навчання.

4. Біомедична реверсна інженерія спрямована на моделювання, відновлення та адаптацію біологічних структур.

–**Основні завдання:** створення протезів та ортопедичних систем; цифрове моделювання кісток і тканин для хірургічного планування; реконструкція анатомічних об'єктів для освіти та досліджень.

–**Методи:** медичне сканування, 3D-сканування тканин, CAD-моделювання біологічних структур, 3D-друк.

–**Галузі застосування:** медицина, стоматологія, пластична хірургія, протезування.

Таблиця 1.1 – Аналіз галузей використання реверсної інженерії

Галузь	Основні об'єкти	Застосування
Машинобудування	Верстати, редуктори, двигуни	Відновлення деталей, модернізація обладнання
Авіаційна промисловість	Лопатки турбін, планери, кабіни	Відновлення та реконструкція деталей літаків і гелікоптерів
Енергетика	Турбіни, кабельні системи, АЕС/ТЕС	Моделювання та ремонт складних об'єктів
Будівництво та архітектура	Будівлі, мости, пам'ятки	Цифрові моделі, реконструкція, BIM
Медицина та біоінженерія	Кістки, тканини, протези	Протезування, планування операцій, стоматологія
Культура та мистецтво	Скульптури, археологічні об'єкти	Реставрація, цифрова архівація
Україна після 2022	Бронетехніка, інфраструктура, протези	Відновлення та модернізація критичних об'єктів

ТЕМА 2. ГЕОМЕТРИЧНІ ОСНОВИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ

2.1. Основні типи геометричних моделей

Геометричні моделі є фундаментальним інструментом для представлення об'єктів у CAD (Computer-Aided Design) та CAE (Computer-Aided Engineering) системах. Вони забезпечують формалізоване описання форми, розмірних параметрів, а також геометричних і топологічних властивостей виробу, що створює основу для його подальшого аналізу, модифікації та виробництва

Каркасні моделі (Wireframe) представляють об'єкт у вигляді системи ліній, які визначають його геометричні контури та просторову структуру. Такий тип моделювання дозволяє відобразити форму та топологію виробу без деталізації поверхонь і об'ємів, що спрощує аналіз та модифікацію складних геометричних об'єктів на ранніх етапах проектування. Переваги каркасних моделей полягають у їх простоті та швидкості побудови, а також у низьких вимогах до обчислювальних ресурсів. Серед недоліків слід зазначити невизначеність об'єму моделі, неможливість однозначно визначити внутрішню та зовнішню частину об'єкта, а також обмежене застосування для проведення аналізу напружень та безпосереднього виготовлення деталей.

Поверхневі моделі (Surface Models) дозволяють описувати форму об'єкта за допомогою поверхонь, що визначають його зовнішні контури та геометричні характеристики. Вони забезпечують більш реалістичне відтворення форми порівняно з каркасними моделями та дозволяють здійснювати точніші візуалізацію та аналіз зовнішньої геометрії виробу. Переваги поверхневих моделей полягають у можливості більш точно відтворювати складні форми, забезпечувати високу якість візуалізації та полегшувати підготовку до виробництва деталей, форма яких має складну зовнішню геометрію. Недоліки включають високу обчислювальну складність, необхідність значних обчислювальних ресурсів, а також обмежену здатність до проведення аналізу внутрішніх властивостей об'єкта та виконання моделювання об'ємних напружень.

Твердотільні моделі (Solid Models) представляють об'єкт у вигляді повного об'єму з визначеними внутрішніми та зовнішніми межами, що дозволяє точно відтворювати його геометричні та топологічні характеристики. Такий підхід забезпечує найбільш повне і реалістичне моделювання виробів, включаючи їх внутрішню структуру, що робить його придатним для аналізу, модифікації та виробництва. Переваги твердотільних моделей полягають у можливості однозначного визначення об'єму та внутрішньої структури об'єкта, точного проведення інженерного аналізу (напружень, теплових процесів, деформацій) та безпосередньої підготовки до виробництва деталей. Недоліки включають значну складність побудови моделей та високі вимоги до обчислювальних ресурсів, що може уповільнювати процес моделювання та вимагати спеціалізованого програмного забезпечення.

2.2 Основні методи побудови геометричних моделей

Параметричне моделювання — це метод створення та управління тривимірними або двовимірними моделями, у якому геометричні характеристики об'єкта визначаються через набір параметрів, таких як довжина, ширина, висота, радіуси, кути та інші числові значення. Ключовою особливістю цього підходу є те, що між різними елементами моделі встановлюються зв'язки або залежності, які автоматично підтримують узгодженість форми при зміні параметрів.

Наприклад, якщо змінюється довжина деталі, всі пов'язані з нею елементи, такі як отвори або фаски, автоматично коригуються відповідно до заданих правил. Це дозволяє швидко вносити зміни, оптимізувати конструкції та уникати необхідності повторного креслення або перебудови моделі з нуля.

Параметричне моделювання широко застосовується в CAD-системах для розробки складних деталей і вузлів, оскільки забезпечує високу гнучкість проектування, зручність редагування та можливість багаторазового використання елементів у нових конструкціях. Воно також полегшує інтеграцію з аналізом (CAE), автоматизованим виготовленням (CAM) та іншими інженерними процесами.

Основні переваги параметричного моделювання включають:

- швидке внесення змін до моделі без необхідності її повного перебудування;
- забезпечення цілісності конструктивних залежностей;
- можливість стандартизації та повторного використання елементів;
- полегшення процесів оптимізації та інженерного аналізу.
- До недоліків можна віднести:
 - складність початкового визначення параметрів та залежностей;
 - необхідність високого рівня підготовки користувача;
 - підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів при моделюванні складних виробів.

Булеві операції (Boolean Operations) — це метод об'єднання, віднімання або перетину геометричних тіл у твердотільному моделюванні з метою створення нових складних форм. Основою цих операцій є логічні принципи булевої алгебри, застосовані до об'ємних об'єктів:

Об'єднання (Union) — поєднує два або більше тіл в одне, зберігаючи обсяг усіх компонентів.

Перетин (Intersection) — створює тіло, що включає лише ту частину простору, яка спільна для всіх об'єктів.

Віднімання (Subtraction/Difference) — віднімає обсяг одного тіла від іншого, формуючи нову форму.

Булеві операції дозволяють інженерам і конструкторам ефективно формувати складні деталі та вузли, комбінуючи прості геометричні форми, без необхідності ручного креслення кожної складної поверхні.

Переваги застосування булевих операцій включають:

- можливість швидкого створення складних геометричних форм;
- точне визначення об'ємних характеристик об'єкта;
- інтеграцію з параметричним та твердотільним моделюванням.

Недоліки:

- при складних або нестандартних формах можуть виникати проблеми з топологією та помилки обчислення;
- висока обчислювальна складність для великих і детальних моделей;
- потреба у високій точності при визначенні меж тіл, що беруть участь у операції.

Побудова примітивів — це метод геометричного моделювання, при якому складна тривимірна модель створюється шляхом використання базових об'ємних або поверхневих форм, так званих геометричних примітивів. До таких примітивів належать куби, циліндри, сфери, конуси, піраміди та інші прості тіла, які слугують «блоками» для формування складніших об'єктів.

Цей підхід дозволяє швидко створювати базову форму виробу та використовувати її як основу для подальшого моделювання, модифікацій або застосування булевих операцій для отримання більш складних конструкцій.

Переваги побудови примітивів:

- простота та швидкість створення базових форм;
- зручність комбінування та модифікації для формування складних об'єктів;
- низькі вимоги до обчислювальних ресурсів на початкових етапах моделювання.

Недоліки:

- обмежена точність відтворення складних геометричних форм без подальших модифікацій;

- необхідність додаткових операцій для досягнення точної форми виробу;

- обмежене застосування для складного аналізу або підготовки до виробництва без додаткового моделювання поверхонь та об'ємів.

Поверхнева реконструкція (Reverse Surface Modeling) — це метод створення поверхневих моделей на основі існуючих фізичних об'єктів або тривимірних даних, отриманих за допомогою 3D-сканування, фотограмметрії чи інших методів вимірювання. Основна мета цього підходу — відтворити точну геометрію об'єкта у цифровому середовищі для подальшого аналізу, модифікації або інтеграції в CAD/CAE системи.

Процес поверхневої реконструкції зазвичай включає кілька етапів: збір даних про об'єкт, обробку хмар точок або вимірювальних даних, побудову поверхневих елементів, а також редагування та оптимізацію моделі для забезпечення точності та зручності використання.

Переваги поверхневої реконструкції:

- можливість створення цифрових моделей складних або нестандартних об'єктів без креслень;

- висока точність відтворення зовнішньої геометрії;

- спрощення процесів аналізу, модифікації та виробництва на основі існуючих виробів.

Недоліки:

- високі вимоги до обчислювальних ресурсів при обробці великих обсягів даних;

- необхідність додаткової оптимізації та редагування моделей для забезпечення топологічної коректності;

- обмежене відтворення внутрішньої структури об'єкта без додаткових методів сканування.

2.3 Інтеграція систем CAD та CAE

Інтеграція систем CAD та CAE ґрунтується на поєднанні двох підходів: побудови геометричної моделі та її інженерного аналізу. У класичному процесі спочатку створюється модель у CAD-системі, де визначаються всі геометричні параметри виробу: форма, розміри, взаємне розташування елементів. На цьому етапі конструктор має повну свободу у створенні конструкції, однак результат поки що є лише віртуальним зображенням, без перевірки його працездатності.

Далі ця сама модель переходить у середовище CAE. Тут вона стає об'єктом інженерного аналізу: на неї накладаються навантаження, граничні умови, задаються фізико-механічні властивості матеріалів. За допомогою чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів, система обчислює, як деталь буде поводитися в реальних умовах експлуатації — чи витримає вона механічні навантаження, як розподілятимуться напруження, чи не відбудеться надмірної деформації або руйнування. Таким чином, модель із суто геометричної перетворюється на інженерно обґрунтовану.

Найважливішим у цій інтеграції є зворотний зв'язок. Результати аналізу повертаються у CAD-середовище, і конструктор одразу бачить, які зміни необхідно внести. Якщо наприклад виявлено, що товщина стінки занадто мала і може призвести до руйнування, у CAD вона збільшується. Якщо ж аналіз показав надлишкову міцність при високій масі, форму деталі оптимізують, щоб зменшити витрати матеріалу. Такий замкнений цикл «моделювання — аналіз — корекція» дозволяє поступово наблизити конструкцію до оптимального варіанта.

Остаточним етапом є передача готової, перевіреної моделі у виробництво. Це може бути САМ-система, яка будує траєкторії інструментів для верстатів із ЧПК, або програмне забезпечення для 3D-друку, що готує модель у форматі STL чи 3MF. Таким чином, об'єкт, створений у CAD, проходить перевірку у CAE й після оптимізації переходить у САМ для виготовлення. Уся система працює як єдиний цифровий конвеєр, де кожен етап логічно доповнює попередній.

Отже, інтеграція CAD і CAE дає змогу уникнути дорогих і тривалих фізичних випробувань, значно скоротити терміни розробки, зменшити кількість прототипів і забезпечити більш високу якість кінцевого продукту. Вона поєднує творчу частину інженерної діяльності з точними розрахунками, роблячи процес проєктування не лише зручним, а й науково обґрунтованим.

ТЕМА 3. РОБОТА З ДАНИМИ СКАНУВАННЯ

Хмари точок (point clouds) — це набір тривимірних координат (X, Y, Z), що представляють поверхню реального об'єкта (Рис. 3.1). Вони є вихідними даними для реверсної інженерії та слугують основою для побудови CAD/CAE моделей.

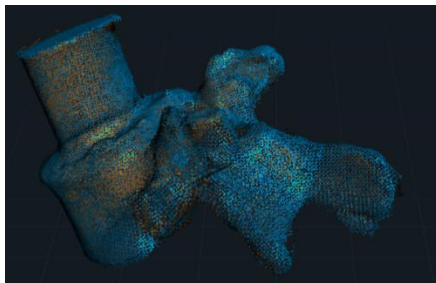


Рисунок 3.1 – Приклад хмари точок

Джерела отримання хмар точок:

1. 3D-сканери;
2. Оптичні сканери;
3. Контактні сканери;
4. Фотограмметрія;
5. СТ-сканування та рентген.

Одним із найпоширеніших джерел є **3D-сканери (Рис. 3.2)**. Серед них виділяють кілька типів. Лазерні сканери застосовуються для великих і складних деталей, адже забезпечують високу точність вимірювань навіть при значних розмірах деталей. Промінь лазера відбивається від поверхні, і за часом його повернення визначають координати точок. Такий метод ідеально підходить для промислових деталей, каркасів автомобілів чи великих вузлів машин.



Рисунок 3.2 – Приклад 3D-сканування

Інший підхід — **оптичні сканери (Рис. 3.3)**, що працюють на основі структурованого світла. Вони проєктують на поверхню об'єкта спеціальний візерунок і фіксують його деформацію камерами. Це дозволяє швидко

отримати детальну модель невеликих виробів із високою точністю. Оптичні системи особливо ефективні для дрібних деталей, медичних імплантів чи виробів із пластику.

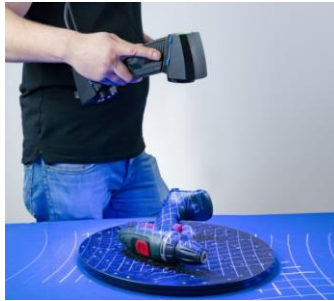
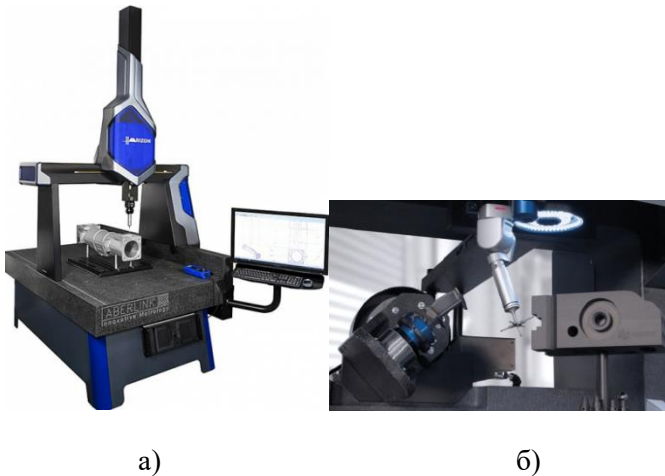


Рисунок 3.3 – Приклад сканування структурованим світлом

Окрему категорію складають **контактні сканери**, або **координатно-вимірювальні машини (КВМ) (Рисунок 3.4)**. У цьому випадку вимірювальна головка фізично торкається поверхні деталі, реєструючи координати. Метод надзвичайно точний, проте повільний, і більше підходить для калібрування або перевірки критичних елементів.



а – контактнo-вимірювальна машина; б – вимірювальна рука

Рисунок 3.4 – Приклади контактного сканування

Ще одним джерелом отримання хмар точок є **фотограмметрія (Рис. 3.5)**. Цей метод ґрунтується на обробці серії фотографій, зроблених з різних ракурсів. За допомогою спеціального програмного забезпечення зображення поєднуються, і на їх основі будується тривимірна модель. Перевага фотограмметрії полягає у можливості дослідження великих об'єктів, де застосування сканерів є занадто дорогим або технічно складним. Так, цей метод широко використовують для цифрової реконструкції архітектурних пам'яток, археологічних знахідок чи об'єктів культурної спадщини.



Рисунок 3.5 – Приклади фотограмметрії

Окремий клас становить **комп'ютерна томографія (СТ-сканування) та рентген (Рис. 3.6)**. На відміну від лазерних та оптичних сканерів, що фіксують лише зовнішню поверхню, томографія дозволяє досліджувати внутрішню структуру об'єкта. Технологія базується на пошаровому рентгеновському скануванні, яке дає можливість побудувати тривимірну модель із закритими порожнинами чи складними внутрішніми каналами. Це робить СТ-сканування незамінним у біомедичній інженерії (наприклад, при створенні імплантів) та в авіакосмічній галузі, де необхідно контролювати якість деталей із композитів.

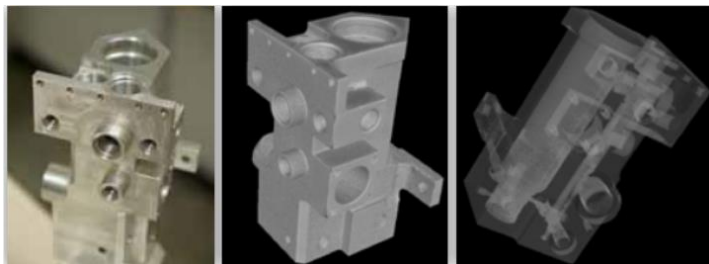


Рисунок 3.6 – Приклад рентгену деталі

Таким чином, джерела отримання хмар точок охоплюють широкий спектр технологій — від контактних вимірювань до безконтактного лазерного та оптичного сканування, фотограмметрії та томографії. Вибір конкретного методу визначається вимогами до точності, габаритами об'єкта, його матеріалом та умовами подальшої обробки.

До характеристик хмар точок відносяться наступні показники:

– **Точність** – визначає, наскільки координати точок відповідають реальній поверхні; залежить від обладнання і методу сканування.

– **Щільність** – кількість точок на одиницю площі; впливає на деталізацію моделі.

– **Розмір файлу** – великі хмари точок можуть містити десятки мільйонів точок, що вимагає потужних обчислювальних ресурсів.

– **Формати збереження:** PLY, OBJ, STL, PTX, 3MF.

Основні відмінності різних методів отримання сканованих даних представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Особливості методів сканування

Метод	Точність	Розмір об'єкта	Обмеження	Типові застосування
Контактне сканування (КВМ, щупи)	Дуже висока (до $\pm 0,001$ мм)	Малий/середній	Повільне, ризик пошкодження крихких деталей	Високоточні деталі, калібрування, лабораторні вимірювання
Лазерне сканування	Висока ($\pm 0,01$ – $0,1$ мм)	Середній/великий	Проблеми з прозорими/дзеркальними поверхнями, велика хмара даних, висока вартість	Машинобудування, будівництво, авіація, прототипування
Структуроване світло	Дуже висока ($\pm 0,05$ мм)	Малий/середній	Проблеми зі скануванням блискучих або прозорих поверхонь	Прототипи, складні форми, медицина, ювелірні вироби
Стереοфотограмметрія	Середня ($\pm 0,5$ – 1 мм)	Малий/великий	Залежність від освітлення та текстури, менша точність	Архітектура, культурна спадщина, будівництво, великі об'єкти

Комп'ютерна томографія (СТ)	Дуже висока ($\pm 0,01-0,1$ мм)	Малий/ середній	Висока вартість, обмеження за розміром, тривалий час сканування	Високоточні литі деталі, турбінні лопатки, інспекція, реверс- інжиніринг внутрішніх компонентів
--	---	--------------------	---	---

3.1 Обробка хмар точок

Після отримання хмари точок необхідно виконати її обробку, оскільки вихідні дані, що надходять із 3D-сканерів чи інших джерел, зазвичай містять шум, артефакти та нерівномірність розподілу точок. Етапи обробки визначають якість та придатність подальшої моделі для CAD/CAE аналізу або виробництва.

Попередня обробка

Насамперед проводиться видалення шумів та артефактів (Рис 3.7). Під час сканування завжди виникають похибки, спричинені відблисками, прозорістю матеріалу чи механічними вібраціями. Це проявляється у вигляді зайвих точок, які не належать реальній поверхні об'єкта. Спеціалізовані програмні пакети (Geomagic, PolyWorks, CloudCompare) дозволяють автоматично чи вручну очистити хмару від таких дефектів.

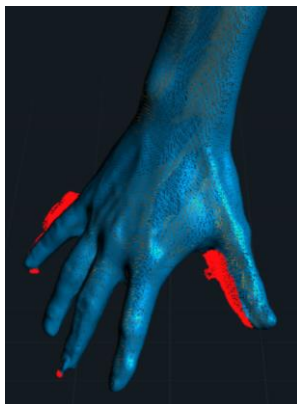


Рисунок 3.7 – Приклад шумів в хмарі точок

Об'єднання

Другим важливим кроком є реєстрація та об'єднання кількох сканів в єдину систему координат. Оскільки об'єкт часто сканують з різних ракурсів, утворюється набір часткових хмар точок, які потрібно поєднати. Використовуються алгоритми автоматичного суміщення (наприклад, ICP – Iterative Closest Point), які зводять усі частини в одну узгоджену модель.

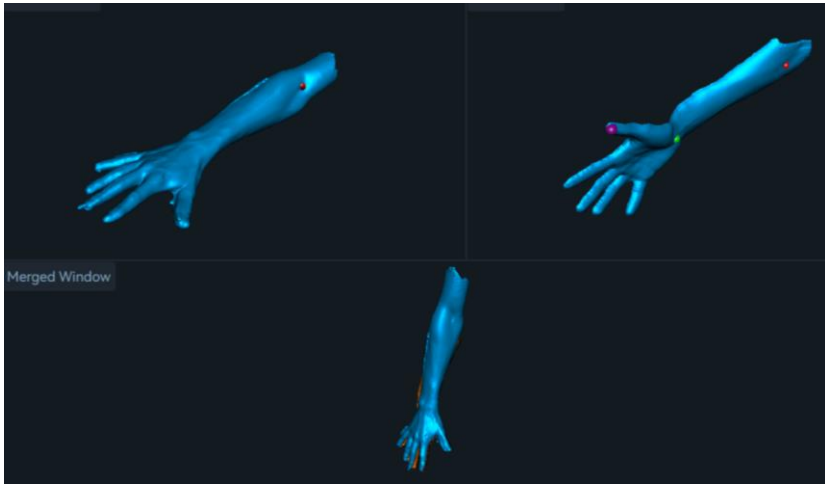


Рисунок 3.8 – Об'єднання сканів в загальну хмару точку

Орієнтація даних

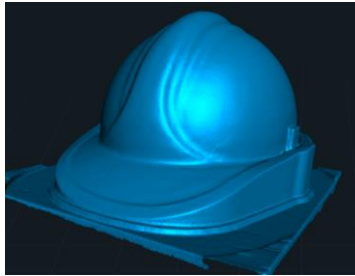
Далі здійснюється вирівнювання та орієнтація даних. Отриману хмару точок необхідно розташувати у зручній системі координат: вирівняти відносно осей, задати базові площини, відцентрувати модель. Це значно спрощує подальшу побудову поверхонь та параметричних елементів у CAD-середовищі.

Створення поверхневих моделей

Після попередньої обробки постає завдання побудови поверхонь, які відображають геометрію об'єкта. Існує два основних підходи: створення трикутних сіток (mesh) та побудова гладких поверхонь NURBS чи B-сплайнів.

Тріангуляційні сітки (mesh) (Рис. 3.9) будуються шляхом перетворення хмари точок у набір з'єднаних між собою трикутників. У результаті формується полігональна модель, яка добре підходить для візуалізації та швидкої перевірки геометрії. Найпоширенішим форматом є

STL (stereolithography), який став стандартом для 3D-друку та адитивних технологій. Такі моделі легко генеруються й відносно прості в обробці, проте мають обмеження: вони не містять параметрів, а лише геометрію. Це означає, що змінити діаметр отвору чи товщину стінки без повної перебудови сітки неможливо. Тому mesh-моделі більше підходять для презентацій, базового аналізу чи швидкого прототипування.



а)



б)

а – Mesh поверхня; б – сітка трикутників які утворюють поверхню

Рисунок 3.9 – Приклад триангуляційні сітки (mesh) об'єкту

Інший підхід — побудова поверхонь **NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)** або **В-сплайнів**. Це гладкі математичні поверхні, які відновлюються на основі полігональної сітки чи безпосередньо хмари точок. На відміну від STL-моделей, NURBS-поверхні можна використовувати у

CAD-системах для створення повноцінних параметричних моделей. Це дає змогу не лише відтворити форму, але й задавати конструктивні особливості: фаски, отвори, радіуси заокруглення, ребра жорсткості. Побудова таких поверхонь складніша і вимагає якісної початкової обробки хмари точок, однак результатом є точна й гнучка модель, придатна для інженерного аналізу та виробництва.

Таким чином, обробка хмар точок є критично важливим етапом реверсної інженерії. Вона перетворює «сирі» дані на структуровані геометричні моделі, придатні для візуалізації, оптимізації чи безпосереднього використання в CAD/CAE середовищах. Вибір між mesh і NURBS-представленням залежить від цілей: швидке прототипування чи високоточне відтворення для серійного виробництва.

ТЕМА 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РЕВЕРС-ІНЖІНІРИНГУ

Для перетворення хмар точок у геометричні моделі застосовуються спеціалізовані програмні пакети, які відрізняються функціональністю, точністю та сферою використання. Серед найбільш поширених можна виділити такі інструменти:

Geomagic Wrap – це одне з найпотужніших комерційних рішень у сфері реверсної інженерії. Програма дозволяє проводити повний цикл обробки даних: від імпорту хмар точок до створення готових CAD-моделей. Вона має зручні інструменти для видалення шумів, артефактів та виправлення локальних дефектів сканування. Далі хмара точок може бути перетворена у mesh-модель (трикутну сітку), що підходить для візуалізації або 3D-друку. Найважливішою функцією є відновлення поверхонь – відновлення поверхонь NURBS на основі полігональної сітки, що дозволяє отримати точні параметричні моделі, готові до використання у виробництві. Geomagic Wrap широко застосовується в автомобільній та авіаційній промисловості, медицині, дизайні та архітектурі.

Autodesk PowerShape – ще один популярний комерційний пакет, який спеціалізується на створенні твердотільних та поверхневих моделей із даних сканування. На відміну від Geomagic, PowerShape орієнтований на інтеграцію з іншими CAD/CAM-рішеннями Autodesk і забезпечує можливість подальшої параметризації геометрії. Це означає, що на основі сіткової моделі можна побудувати повноцінну CAD-модель із параметрами: отвори, фаски, радіуси заокруглення, технологічні елементи. PowerShape

особливо зручний у машинобудуванні та металообробці, де після відновлення моделі потрібно одразу переходити до підготовки виробництва.

CloudCompare та MeshLab – це безкоштовні, відкриті інструменти, які надають базовий і середній рівень функціональності для роботи з хмарами точок та сітковими моделями. CloudCompare орієнтований на наукові дослідження та інженерні завдання: він дозволяє порівнювати 3D-моделі, виконувати реєстрацію кількох сканів, аналізувати відхилення поверхонь. MeshLab більше підходить для візуалізації та редагування: очищення даних, створення mesh-моделей, спрощення сіток, оптимізація файлів для 3D-друку. Обидві програми активно застосовуються у навчанні, архітектурі, культурній спадщині та невеликих інженерних проєктах, де немає можливості придбати комерційне ПЗ.

Magics – це спеціалізоване програмне забезпечення від бельгійської компанії Materialise, орієнтоване на підготовку цифрових моделей до 3D-друку та адитивного виробництва. Система дозволяє працювати з моделями у форматі STL та сумісна з більшістю сучасних 3D-принтерів. Її основна функціональність зосереджена на перевірці та виправленні геометрії: автоматичне закриття дірок, усунення самоперетинів, корекція нормалей, оптимізація товщини стінок. Крім того, Magics надає інструменти для створення підтримок (supports), що є критично важливим етапом у технологіях SLM, SLA та FDM. Вбудовані алгоритми дозволяють автоматично обирати оптимальну орієнтацію об'єкта на робочій платформі, що зменшує кількість матеріалу та час друку. Magics широко застосовується у медицині (3D-друк імплантів і протезів), авіакосмічній та автомобільній галузі, де важлива точність і якість надрукованих деталей. Недоліком є те, що Magics практично не підтримує класичні CAD-функції, тому для побудови або редагування параметричних моделей потрібно використовувати інші системи.

QSpec – це вузькоспеціалізоване програмне забезпечення для контролю якості та аналізу результатів 3D-сканування. Основне завдання системи – автоматизоване порівняння відсканованої геометрії з еталонною CAD-моделлю. На основі цих даних QSpec будує карти відхилень, які показують різницю між реальною деталлю та цифровим прототипом. Програма дозволяє виконувати вимірювання розмірів, перевіряти геометричні допуски та створювати звіти згідно зі стандартами ISO. Це робить її корисною у серійному виробництві, де важливо швидко і точно відслідковувати відхилення та забезпечувати стабільність якості. QSpec не має потужних засобів для редагування чи моделювання, тому використовується у поєднанні з CAD/CAE-системами або реверс-

інженерними пакетами. Найчастіше застосовується у машинобудуванні, при масовому випуску деталей, а також у авіаційній галузі для контролю критичних компонентів.

Універсальні CAD-системи (SolidWorks, CATIA, Siemens NX). До універсальних CAD-систем належать такі системи, як SolidWorks, CATIA та Siemens NX. Вони не є суто реверс-інженерними інструментами, але дозволяють імпортувати дані 3D-сканування (mesh, хмари точок) і на їх основі створювати параметричні CAD-моделі.

SolidWorks більше підходить для середнього та малого бізнесу, навчання і простіших завдань, оскільки має зручний інтерфейс та базові інструменти роботи з mesh-моделями. Водночас, у випадку складних органічних поверхонь його можливості обмежені.

CATIA, розроблена Dassault Systèmes, вважається найкращим рішенням у сфері авіа- та автомобілебудування. Вона підтримує високоточну реконструкцію складних поверхонь, інтеграцію з PLM-системами, CAM та CAE-модулями, що дозволяє реалізувати повний цикл – від 3D-сканування до виробництва.

Siemens NX поєднує потужні можливості моделювання та інженерного аналізу. Його особливістю є глибока інтеграція із виробничими процесами та CAM-модулями, що робить його зручним для високотехнологічного машинобудування.

Недоліком універсальних систем є висока вартість та ресурсоемність, особливо у випадку CATIA та NX. Проте вони забезпечують унікальну перевагу – можливість працювати з реверс-інженерними даними у контексті всього виробничого циклу.

Таблиця 4.1 – Порівняння програмного забезпечення для реверс-інжинірингу

Програмне забезпечення	Основні функції	Переваги	Обмеження	Типові сфери застосування
Geomagic Wrap	Обробка хмар точок, ресерфейсинг (NURBS), побудова mesh	Інтуїтивний інтерфейс, потужні алгоритми побудови поверхонь	Обмежені можливості параметризації	Машинобудування, реставрація, CAD-моделі
PowerShape	Редагування та параметризація	Гібридне моделювання, інтеграція з	Складніше освоєння	Виробництво, інструментобудування, прес-форми

	ія геометрії, створення solid-моделей	CAM		
Magics	Очищення STL, створення підтримок, оптимізація друку	Потужне рішення для 3D-друку, підтримка багатьох форматів	Орієнтоване на адитивне виробництво	3D-друк, адитивні технології, медицина
QSpec	Порівняння скану з CAD, карти відхилень, контроль допусків	Автоматичні звіти, відповідність ISO	Обмежений функціонал для моделювання	Контроль якості, інспекція серійного виробництва
SolidWorks	Параметричн е моделювання , reverse-to- feature	Простота, доступність, інтеграція з CAM	Слабкі засоби роботи зі складними поверхнями	МСП, навчання, машинобудування
CATIA	Робота зі складними поверхнями, PLM інтеграція	Найкраще для авіа/авто промисловост і	Висока вартість, потребує потужних ресурсів	Авіація, автомобілебудува ння
Siemens NX	Параметричн е моделювання , CAE, PLM	Висока точність, комплексне середовище	Складність освоєння, дороговизна	Високоточне машинобудування , енергетика

ТЕМА 5. ТОПОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ 3D-МОДЕЛЕЙ

Топологічний аналіз описує структуру 3D-моделі, тобто взаємозв'язки між її елементами: вершинами, ребрами, гранями та об'ємом. Він дозволяє інженеру зрозуміти «скелет» моделі і є ключовим етапом реверсної інженерії, особливо при переході від mesh-моделі до параметричної CAD-моделі.

Основні поняття топології моделей (Рис. 5.1):

1. Vertex (вершина) - це найпростіший топологічний об'єкт – точка у тривимірному просторі, що визначає координати вузла. Вершини є основою для побудови ребер і граней.

2. Edge (ребро) - це відрізок, що з'єднує дві вершини. Визначає межу між гранями. Ребро може бути прямим або криволінійним (наприклад, дуга кола).

3. Face (грань) - це поверхня, обмежена ребрами. Грань може бути плоскою (як у куба) або криволінійною (наприклад, у сфери чи циліндра). Кожна грань має власну орієнтацію (нормаль).

4. Loop (петля / цикл) - це замкнена послідовність ребер, що утворює межу грані. У простих випадках (наприклад, квадратна грань куба) loop один. У складних гранях можуть бути кілька loops: зовнішній контур і внутрішні отвори (наприклад, грань із отвором).

5. Shell (оболонка) - сукупність граней, об'єднаних у замкнену поверхню. Shell може бути зовнішнім (обмежує тіло ззовні) або внутрішнім (порожнина всередині).

6. Body (тіло / solid) - сукупність оболонок, що утворюють замкнений тривимірний об'єм. Body має масу, об'єм та інші фізичні характеристики. Це головний елемент моделі у CAD-системі, з яким виконують операції.

7. Fin (псевдо-ребро, допоміжний елемент) - топологічна сутність, що з'єднує loop із гранню. Використовується для внутрішнього представлення структури в B-Rep. Дає змогу визначати орієнтацію ребра відносно грані. У звичайних користувацьких моделях його не видно, але він критичний для правильного зберігання топології.

8. Region (область) - область простору, що обмежена оболонками (shells). Кожне тіло складається з однієї або кількох областей (наприклад, зовнішній об'єм і внутрішні порожнини).

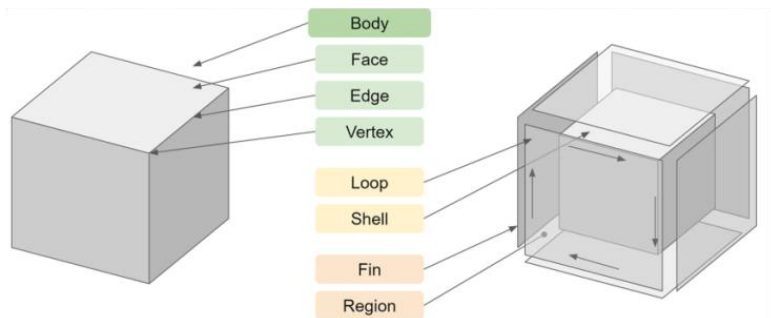


Рисунок 5.1 – Топологія моделі

Мета топологічного аналізу

1. Виявлення критичних елементів моделі (складні грані, вузькі ребра, отвори).

Топологічний аналіз дозволяє ідентифікувати ті ділянки моделі, які можуть ускладнювати подальшу реконструкцію чи обробку. Наприклад, тонкі виступи, мікроотвори або дуже криволінійні поверхні часто стають джерелом помилок при побудові CAD-моделі. Їхнє своєчасне виявлення дає можливість прийняти рішення: зберігати їх у вихідному вигляді чи спростити для подальшого моделювання.

2. Перевірка цілісності mesh-моделі перед реконструкцією поверхонь.

Сітка трикутників (mesh), отримана зі сканування, нерідко містить дефекти: «дірки» у сітці, накладення граней, неправильну орієнтацію нормалей. Такі помилки унеможливають точну побудову поверхонь. Топологічний аналіз дозволяє виявити ці недоліки та усунути їх ще на попередньому етапі, забезпечуючи цілісність моделі.

3. Визначення оптимальних шляхів побудови NURBS-поверхонь.

NURBS-представлення є базовим для більшості CAD-систем, але його побудова потребує якісної сегментації mesh-моделі. Топологічний аналіз допомагає знайти межі майбутніх поверхонь, визначити, які з них можуть бути відтворені простими геометричними елементами (площинами, циліндрами, сферами), а де потрібні складні сплайнові поверхні. Це дозволяє оптимізувати процес моделювання та уникати зайвої складності.

4. Підготовка до параметризації у CAD-системах (reverse-to-feature).

Після реконструкції геометрії важливим етапом є перетворення отриманої моделі на параметричну, тобто таку, що описується розмірними параметрами й технологічними ознаками (отвори, фаски, пази тощо). Топологічний аналіз допомагає правильно виділити ці ознаки у mesh-моделі, зіставити їх із відповідними параметричними об'єктами у CAD і забезпечити точність переходу від «сканованої геометрії» до «конструктивної моделі».

Основні процедури топологічного аналізу

1. Перевірка зв'язності.

Ця процедура передбачає аналіз того, чи утворює набір граней замкнену поверхню без розривів і самоперетинів. Технічно це реалізується шляхом пошуку «висячих» ребер (які належать лише одній грані), виявлення отворів у сітці та перевірки орієнтації нормалей. Результатом є

гарантія того, що модель може бути інтерпретована як «водонепроникний об'єм» (watertight model), придатний для подальшої реконструкції чи виробництва.

2. Виділення елементів (Feature Recognition).

На цьому етапі топологічного аналізу автоматично або напівавтоматично визначаються характерні конструктивні ознаки: плоскі поверхні, циліндри, конуси, отвори, фаски. Система перетворює їх із набору трикутників mesh-моделі у параметричні елементи CAD. Такий підхід дозволяє перейти від грубої геометрії до осмисленої інженерної моделі з ознаками, що підлягають редагуванню.

3. Аналіз складності поверхні.

У межах цієї процедури розраховуються локальні параметри кривизни поверхонь, визначаються ділянки зі змінним радіусом або з перегинами. Це дає змогу класифікувати поверхні на прості (які можна описати стандартними геометричними примітивами) та складні (які потребують NURBS-моделювання). Результати аналізу використовуються для вибору стратегії виробництва: чи можна застосувати стандартне фрезерування, чи потрібна високоточна 5-осьова обробка або адитивні технології.

4. Структурний аналіз (Graph-Based Topology).

Модель подається у вигляді графа, де вузли відповідають вершинам або характерним точкам, а ребра — їхнім зв'язкам. Це дає змогу формалізувати структуру виробу та виконувати різні алгоритмічні операції: пошук замкнених контурів (loops), оптимізацію розгортки поверхонь, виділення критичних зон. У виробничих застосуваннях структурний аналіз допомагає планувати послідовність технологічних операцій і забезпечує ефективну інтеграцію з системами автоматизованого проектування та CAM.

5.1 Методи апроксимації та інтерполяції даних

Апроксимація та інтерполяція є ключовими математичними методами у реверсній інженерії для перетворення хмар точок або дискретних даних у гладкі поверхні та параметричні моделі. Вони дозволяють відтворити форму об'єкта із мінімальною похибкою та забезпечують подальше використання моделі у CAD/CAE системах.

Інтерполяція

Інтерполяція – це процес побудови функції або поверхні, яка точно проходить через всі наявні точки вимірювань.

Основні методи інтерполяції:

1. Лінійна інтерполяція.

Виконується шляхом з'єднання сусідніх точок прямими відрізками. Метод простий і швидкий у реалізації, підходить для ділянок із незначною кривизною, проте створює злами на криволінійних поверхнях. Застосовується для попереднього аналізу даних або у випадках, коли точність не є критичною.

2. Поліноміальна інтерполяція.

Передбачає побудову поліномів, які проходять через усі точки. Найбільш поширені варіанти — сплайни, зокрема **В-сплайни** та **кубічні сплайни**. Вони дозволяють досягти високої гладкості кривих і поверхонь, зберігаючи локальне керування формою. Недоліком є можливість появи осциляцій при великій кількості точок (ефект Рунге), що обмежує застосування цього методу для дуже щільних хмар.

3. Радіальні базисні функції (RBF).

Використовуються для інтерполяції тривимірних нерегулярних даних. Функція будується так, щоб значення в будь-якій точці залежало від відстані до сусідніх контрольних точок. Цей метод забезпечує гладке відтворення складних геометрій і особливо корисний при роботі з органічними формами або деталями зі складною криволінійною структурою.

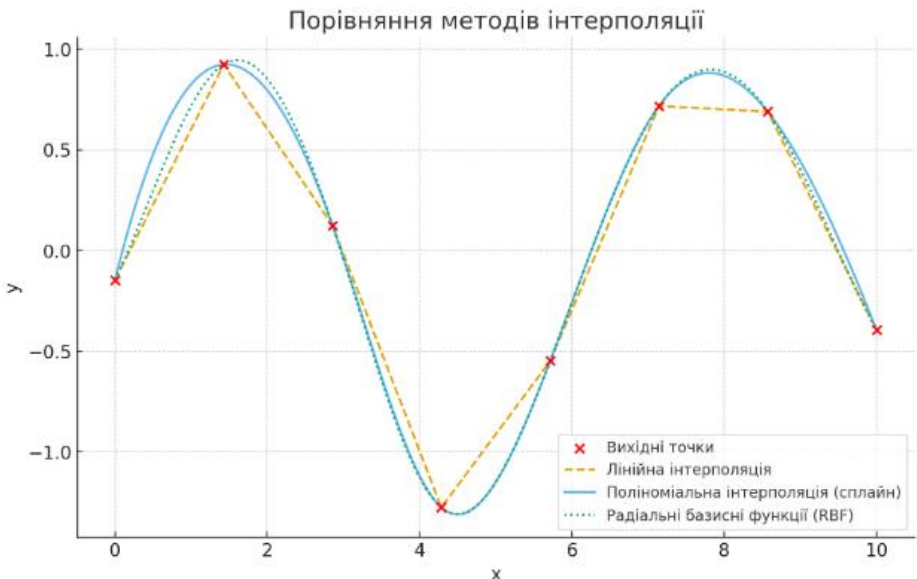


Рисунок 5.2 – Порівняння методів інтерполяцій

Апроксимація

Апроксимація – це процес побудови функції або поверхні, що наближено відтворює форму даних, але не обов’язково проходить через усі точки.

Основні методи апроксимації:

1. Метод найменших квадратів (Least Squares).

Побудована поверхня мінімізує суму квадратів відхилень між фактичними точками та теоретичною моделлю. Метод особливо ефективний для створення **NURBS-поверхонь** та параметричних моделей, оскільки забезпечує баланс між точністю та компактністю опису.

2. Поліноміальна апроксимація.

Використовуються поліноми певного порядку для опису даних. Підходить для регулярних і гладких форм, наприклад у випадку деталей із простою геометрією.

3. Сплайнова апроксимація.

Базується на використанні В-сплайнів або NURBS, але з меншою кількістю контрольних точок, ніж кількість вихідних даних. Це дозволяє суттєво зменшити обсяг моделі, одночасно згладивши випадкові шумові точки, що часто виникають під час сканування.

Вибір методу:

– **Інтерполяція** використовується, коли потрібна максимальна точність відтворення форми.

– **Апроксимація** застосовується для обробки даних з великою кількістю шумів, зменшення кількості точок і спрощення моделі.

РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ПЕРЕВІРКИ ДАНИХ

У процесі реверсної інженерії отримана цифрова модель потребує обов’язкової перевірки. Це необхідно для того, щоб переконатися у відповідності відновленої геометрії реальному об’єкту, забезпечити правильність відтворення функціональних властивостей та підтвердити можливість подальшого використання у виробництві чи моделюванні.

Аналіз і перевірка охоплюють кілька рівнів: від порівняння з еталонними даними та метрологічного контролю до функціональних тестів і валідації у віртуальних середовищах. Сукупність цих процедур дозволяє гарантувати точність, надійність та практичну цінність цифрової моделі.

6.1 Порівняння моделі з еталонними даними

Одним із ключових етапів у процесі реверсної інженерії є перевірка відповідності відновленої моделі реальному об'єкту або технічній документації. Для цього застосовується процедура порівняння моделі з еталонними даними (reference comparison). Її основна мета полягає у кількісному та візуальному зіставленні геометрії, що була отримана в результаті сканування та реконструкції, із «еталоном»: початковим CAD-файлом, хмарою точок з високоточного сканування чи сертифікованими результатами координатних вимірювань.

Порівняння виконується за допомогою спеціалізованих алгоритмів і програмного забезпечення. Результатом є числові метрики (середнє відхилення, стандартне відхилення, середньоквадратичне відхилення, максимальні локальні відхилення), а також наочні кольорові карти (deviation maps) (Рис. 6.1), які показують зони перевищення або відповідності допускам. Такі карти дозволяють швидко оцінити якість відтворення та визначити критичні місця, що потребують корекції.

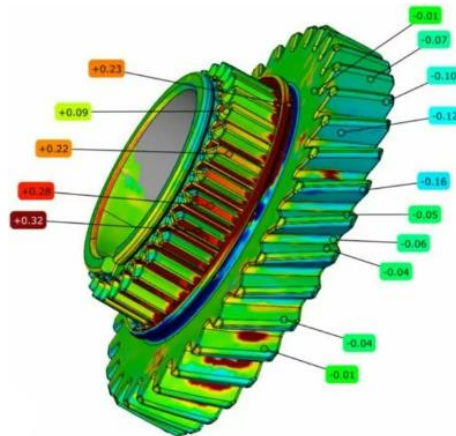


Рисунок 6.1 – Карта відхилень (deviation map)

Основні етапи процедури порівняння:

Першим кроком є підготовка еталону. Еталонні дані повинні мати максимальну достовірність: це може бути оригінальна CAD-модель від виробника, сертифікований набір вимірювань з координатно-вимірювальної

машини або ж хмара точок, отримана високоточним сканером. Від якості еталонних даних залежить коректність усіх наступних результатів.

Другий етап — реєстрація або вирівнювання моделей. Існує кілька підходів. Найбільш поширений метод **best-fit alignment** полягає в мінімізації сумарних відхилень між моделлю та еталоном і застосовується у випадках, коли необхідно швидко оцінити загальну точність відновлення.

Для критично важливих деталей застосовують **datum-based alignment** — вирівнювання за контрольними поверхнями або базовими точками. Цей метод дозволяє виявити навіть систематичні деформації, які best-fit може замаскувати.

Третім етапом є вибір методу порівняння. У практиці реверсної інженерії використовують кілька підходів:

- **point-to-surface** — кожна точка хмари порівнюється з поверхнею CAD-моделі або mesh-моделі;
- **surface-to-surface** — порівняння поверхонь між двома моделями;
- **cloud-to-cloud** — безпосереднє зіставлення двох хмар точок.

Далі виконується обчислення метрик точності. Використовуються середнє відхилення, середньоквадратична похибка, максимальні локальні відхилення, Hausdorff distance, відсоток точок у межах допуску. Такі метрики дозволяють кількісно оцінити ступінь відповідності.

Важливою складовою є генерація візуалізації — кольорових карт відхилень. Вони відображають розподіл похибок по поверхні деталі: сині ділянки можуть означати відхилення в одну сторону, червоні — у протилежну, а зелений колір — повну відповідність.

Остаточний етап — формування звіту і прийняття рішення. Залежно від отриманих результатів модель може бути визнана придатною для подальшого використання, відправлена на корекцію або ж відхилена, якщо відхилення перевищують допустимі норми.

6.2. Методи метрологічного контролю

Метрологічний контроль є ключовим етапом перевірки відновлених або створених моделей у процесі реверсної інженерії. Його основне завдання полягає у кількісній перевірці відповідності геометрії виробу до еталонних вимог, креслень або технічних умов. На відміну від порівняння з еталоном, що здебільшого дає візуальну картину відхилень, метрологічний контроль забезпечує офіційні вимірювальні дані, придатні для сертифікації та підтвердження якості.

Основні методи і прилади

Координатно-вимірювальні машини це найточніші прилади для контактного вимірювання складних деталей. Вони дозволяють визначати положення точок у просторі, вимірювати діаметри отворів, кути, площини та інші елементи геометрії. КВМ незамінні для контролю виробів із жорсткими допусками, а також під час калібрування еталонів.

Роботизовані КВМ та вимірювальні щупи поєднують високу точність звичайних КВМ і гнучкість роботизованих систем. Застосовуються при контролі великогабаритних об'єктів або деталей складної конфігурації, де ручний контроль ускладнений.

Портативні вимірювальні руки та лазерні трекери використовуються для вимірювання великих виробів (наприклад, кузовів автомобілів, частин літаків). Вони дозволяють швидко збирати дані в умовах виробничого цеху, хоча поступаються КВМ у точності.

Оптичні системи (сканери структурованого світла, лазерні сканери) дають змогу безконтактно отримати велику кількість точок і створити детальну хмару. Добре підходять для деталей складної геометрії або м'яких поверхонь. Однак результати можуть залежати від відбивної здатності матеріалу, температури й умов освітлення.

Комп'ютерна томографія використовується тоді, коли потрібно перевірити внутрішні структури, що не можна виміряти іншими методами. Дає змогу виявити внутрішні дефекти — порожнини, тріщини, включення.

Калібровані шаблони та габаритні пристосування це найшвидший спосіб перевірки серійних виробів. Вони не дають високої точності, але дозволяють швидко відсіяти непридатні деталі у масовому виробництві.

Методологія та точність

1. Планування вимірювань

– Визначення **критичних розмірів** — тих, що найбільше впливають на функціональність виробу (наприклад, діаметр отвору під підшипник, товщина стінки, відстань між монтажними поверхнями).

– Вибір **базових елементів**: площини, осі, точки, які служать системою координат для всіх вимірювань. Від правильного вибору баз залежить точність результатів контролю.

– Встановлення **кількості точок вимірювання**: для складних поверхонь важливо покривати всю геометрію, а не лише вибіркові місця. Для плоских поверхонь достатньо декількох контрольних точок, для криволінійних — десятків чи сотень.

– Врахування **допусків креслення**: якщо допуск дуже жорсткий, потрібно планувати більше контрольних точок і використовувати точніші прилади.

2. Калібрування

– Кожний вимірювальний прилад має бути каліброваним згідно ISO 17025 або національних стандартів.

– Калібрування виконується за допомогою еталонних блоків, куль, калібрів, сертифікованих метрологічними центрами.

– Ведеться журнал калібрування, де фіксують дату, відхилення, результати тестування та наступний термін перевірки.

– Калібрування критично важливе для KBM і лазерних трекерів, оскільки навіть невелика похибка у масштабі (0.01–0.02 мм) може призвести до відбракування цілої партії деталей.

3. Температурна компенсація

– Матеріали змінюють розміри при нагріванні/охолодженні. Наприклад, для сталі коефіцієнт теплового розширення становить $\sim 11 \cdot 10^{-6}$ при $1/^\circ\text{C}$. Це означає, що деталь довжиною 1 м змінить розмір на 11 мкм при зміні температури всього на 1°C .

– У високоточних вимірюваннях навіть такі зміни є суттєвими, отже треба виконати наступні вимоги:

а. Вимірювання виконуються у спеціальних кімнатах з температурою $20 \pm 2^\circ\text{C}$ і контрольованою вологістю.

б. Якщо вимірювання проводять у виробничому цеху, застосовують **математичні коефіцієнти компенсації**, враховуючи температуру деталі й приладу.

с. Деякі сучасні KBM мають **вбудовані датчики температури**, які автоматично вносять корекції у вимірювання.

– Важливо витримати деталь у кімнаті певний час (акліматизація), щоб вона набрала стабільну температуру перед вимірюванням.

4. Оцінка невизначеності вимірювань

– Будь-який результат вимірювання має невизначеність — діапазон, у якому знаходиться справжнє значення.

– Формується так званий бюджет похибок, де враховують:

а. Прилад — похибка системи (наприклад, ± 2 мкм для KBM).

b. Оператор — вплив людського фактору (сила притискання щупа, вибір точок, послідовність).

c. Середовище — температура, вологість, вібрації, чистота поверхні.

d. Деталь — матеріал, шорсткість, відбивна здатність (для оптики), наявність внутрішніх напружень.

– У звіті результат подається як:

$$X_p = x \pm U(k), \quad (6.1)$$

де X_p — значення розміру з врахуванням невизначеності,

x — виміряне значення,

U — невизначеність,

k — коефіцієнт охоплення (зазвичай $k=2$, що відповідає довірчій ймовірності 95%)

У метрологічному контролі широко застосовуються стандарти GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing), що дозволяють задати функціональні допуски. Звіти формуються відповідно до стандартів ISO або ASME, що забезпечує їх офіційне визнання у міжнародній практиці.

6.3. Тестування функціональних властивостей

Функціональне тестування спрямоване на перевірку не лише геометричної відповідності відновленої моделі, а й її здатності виконувати задані експлуатаційні функції. Це дозволяє визначити, чи готова модель до використання у складі виробу, чи витримає вона навантаження, температурні та інші впливи, і чи узгоджується з іншими компонентами системи.

Категорії функціональних тестів

1. Кінематичні та посадкові тести:

– Перевіряється збірність вузлів, правильність розташування елементів, відсутність колізій. Виконуються у CAD-системах (assembly check, motion study) або на фізичних макетах.

2. Аналіз інтерференцій та 3D-сумісності:

– Використовується для автоматичного виявлення перетинів між деталями.

- Визначаються мінімальні зазори, можливі "зачеплення" при русі механізмів.

- Дає можливість ще на етапі проектування уникнути помилок, які важко та дорого виправляти на виробництві.

3. Механічні випробування:

- **Статичні** — моделювання або фізичні випробування на міцність, жорсткість, прогин.

- **Втомні** — дослідження ресурсу при циклічних навантаженнях (аналіз часу до руйнування).

- **Локальні** — вивчення напружень у зонах контактів, різьбових з'єднаннях, концентраторів напружень.

4. Термомеханічні тести:

- Перевірка поведінки моделі при температурних коливаннях.

- Оцінка теплового розширення, теплопередачі та стійкості до термонавантажень.

- Використовуються для деталей двигунів, електронних блоків, конструкцій зі змішаних матеріалів.

5. Гідродинамічні та аеродинамічні випробування:

- Аналіз впливу рідинних або газових потоків на об'єкт.

- Застосовуються CFD-методи (Computational Fluid Dynamics) для визначення опору, підйомної сили, турбулентних режимів.

- Актуальні для корпусів насосів, трубопроводів, обтічників літальних апаратів.

6. Електромагнітні та електротехнічні тести

- Використовуються для моделей із вбудованими електронними компонентами.

- Перевірка розташування елементів, умов охолодження, доступності для сервісного обслуговування.

- У складних системах аналізують ще й електромагнітну сумісність.

Послідовність виконання тестів

1. Початкова перевірка у CAD

- а. Виявлення колізій та некоректних посадок у віртуальному середовищі.

- б. Аналіз зазорів і перевірка кінематичних рухів у складанні.

2. Віртуальні випробування (CAE)

- а. Використання методів FEA (Finite Element Analysis), CFD, MBD (Multi-Body Dynamics).

б. Оцінка напружено-деформованого стану, теплопередачі, динаміки руху механізмів.

3. Експериментальна валідація

а. Випробування на фізичних прототипах: статичні стенди, динамічні тести, кліматичні камери.

б. Дає можливість перевірити віртуальні результати у реальних умовах.

4. Порівняння результатів

а. Узгодження даних симуляцій і фізичних вимірювань.

б. Калібрування віртуальних моделей (корекція матеріальних властивостей, коефіцієнтів тертя, умов контакту).

Критерії проходження тестів

– Відповідність вимогам технічного завдання, стандартів (ISO, ASME, галузеві норми).

– Виконання умов надійності: запас міцності $\geq 1,5 \dots 2$, допустимі деформації не перевищені.

– Мінімальні зазори й відсутність критичних колізій.

– Для серійного виробництва — врахування статистичних показників:

1. Ймовірність відмов,

2. Середній час до відмови,

3. Коефіцієнт запасу надійності.

6.4. Валідація у віртуальних середовищах

Валідація у віртуальному середовищі — це системний процес перевірки цифрової моделі за допомогою чисельних методів (CAE: FEA, CFD, MBD, мультифізика), спрямований на підтвердження її адекватності реальним умовам роботи. Така перевірка дозволяє ще до виготовлення фізичних прототипів переконатися, що модель коректно відображає фізичні процеси, та скоротити кількість натурних експериментів.

Ключові аспекти валідації та верифікації

1. Верифікація і валідація (V&V)

– Верифікація (Verification) визначає чи правильно реалізована модель у програмному забезпеченні (правильність алгоритмів, відсутність чисельних помилок).

– Валідація (Validation) визначає чи адекватно модель відтворює реальність (зіставлення симуляцій із експериментами).

2. Калібрування матеріальних моделей і граничних умов

– Підбір реалістичних матеріальних параметрів (модуль пружності, коефіцієнти Пуассона, характеристики втоми).

– Налаштування граничних умов (навантажень, контактів, коефіцієнтів тертя) відповідно до фізичних експериментів.

3. Convergence / Mesh sensitivity

– Дослідження залежності результатів від розміру та якості сітки.

Мета — отримати стабільні результати без зайвих обчислювальних витрат.

4. Co-simulation та мультифізичні сценарії

– Поєднання різних типів аналізу: структурного, теплового, гідродинамічного, електромагнітного.

– Забезпечення коректної передачі даних між різними системами перевірки.

5. Digital Twin / HIL / SIL

– Цифровий двійник — віртуальна копія реального об'єкта, що оновлюється даними з сенсорів (IoT).

– HIL (Hardware-in-the-Loop): тестування алгоритмів керування з підключенням фізичного обладнання.

– SIL (Software-in-the-Loop): перевірка програмних алгоритмів у віртуальному середовищі.

Ризики та типові помилки

– Неправильні граничні умови → симуляція відрізняється від реального експерименту.

– Ігнорування нелінійностей → помилки в оцінці пластичних деформацій, контактів.

– Неточні матеріальні дані → особливо актуально для композитів та 3D-друку.

– Недостатня щільність сітки → спотворення результатів у зонах концентрацій напружень.

Рекомендації

- Виконуйте поетапну валідацію: спочатку прості статички, потім динаміка й мультифізика.
- Робіть mesh convergence лише на критичних ділянках, а не на всій моделі.
- Ведіть бібліотеку валідаційних кейсів для повторного використання.
- Для цифрових двійників регулярно оновлюйте модель на основі даних з експлуатації.

ТЕМА 7. НОРМАТИВНА ТА ПРАВОВА БАЗА ПРИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ

Реверс-інжиніринг є міждисциплінарною діяльністю: він одночасно стосується інженерії, інтелектуальної власності, права на ремонт, безпеки та добросовісної конкуренції.

Умови використання відновлених моделей суттєво відрізняються залежно від:

– сфери застосування:

а. у машинобудуванні реверсна інженерія часто використовується для відновлення деталей, що зняті з виробництва, або для підвищення ремонтпридатності обладнання;

б. в ІТ та електроніці — для аналізу протоколів, сумісності та кібербезпеки;

с. у медицині — для створення індивідуальних імплантів і протезів, що потребує суворої сертифікації;

– юрисдикції:

а. у Європейському Союзі діють суворі норми захисту авторського права, патентів і дизайну, але допускається реінжиніринг для взаємозамінності та навчання;

б. у США підхід гнучкіший: реінжиніринг часто підпадає під принцип "fair use" (сумлінне використання), проте комерційне копіювання виробів із чинними патентами переслідується;

с. в інших країнах (наприклад, в Азії) практика ще більш різнорідна, іноді орієнтована на національні інтереси та локальне виробництво.

Таким чином, реверсна-інженерія перебуває на межі між технічним інструментом і правовим регулюванням, а її правомірність визначається поєднанням інженерних цілей, юридичного контексту та етичних стандартів.

7.1 Авторське право та патентні обмеження

Авторське право захищає оригінальні креслення, 3D-моделі, технічну документацію та інші форми вираження інженерних рішень як об'єкти інтелектуальної власності. Відтворення, розповсюдження або публічне використання таких матеріалів без дозволу власника вважається порушенням авторських прав. Важливо розрізняти ідею та спосіб її вираження: сама ідея чи принцип роботи не охороняється авторським правом, захищається лише конкретне оформлення, наприклад, креслення, модель або документація. За порушення авторських прав передбачено цивільно-правові санкції, штрафи та, у деяких випадках, кримінальну відповідальність.

Патент захищає технічні рішення, винаходи, нові пристрої або способи виконання процесів. Використання технології, відтвореної за допомогою реверсної інженерії, без ліцензії патентовласника є порушенням, навіть якщо креслення або модель отримані самостійно. Патент діє обмежений строк, зазвичай двадцять років від дати подачі заявки, після чого технічне рішення стає суспільним надбанням і може вільно використовуватися. Патентне законодавство охоплює як самі продукти, так і методи їх виготовлення.

Торгові марки захищають логотипи, найменування та брендове оформлення, тоді як індустріальний дизайн — зовнішній вигляд виробу. Повне копіювання зовнішнього вигляду продукту може кваліфікуватися як порушення прав на дизайн або як введення споживача в оману.

У багатьох країнах допускається реверсна інженерія з метою забезпечення сумісності, створення деталей для ремонту або аналізу програмного забезпечення для виявлення помилок і забезпечення безпеки. Важливо дотримуватися мети використання, оскільки комерційне відтворення без ліцензії вважається незаконним навіть за легально отриманими технічними рішеннями.

Перед початком реверсного аналізу слід перевіряти, чи об'єкт або технологія захищені патентом або авторським правом, використовувати ліцензійні угоди у комерційних проєктах та документувати процес для підтвердження законності та етичності виконаної роботи.

7.2. Етичні аспекти

Реверсна інженерія не обмежується лише технічними та правовими питаннями, вона має значні етичні аспекти. Використання відновлених моделей може приносити суспільну користь, але водночас несе ризики недобросовісного використання та шкоди безпеці.

Однією з головних етичних задач є баланс інтересів. З одного боку, реверсна інженерія дозволяє ремонтувати обладнання, продовжувати його життєвий цикл та знижувати витрати для користувачів. З іншого боку, вона може застосовуватися для недобросовісного копіювання продуктів, що створює конкурентні переваги за рахунок чужої інтелектуальної власності.

Питання безпеки займає окреме місце. Відновлення та використання моделі без належних перевірок може призвести до аварій, відмов обладнання або негативних наслідків для людей. Це особливо критично у сферах медицини, авіації та оборони, де помилка може мати серйозні наслідки.

Суспільна користь від реверсної інженерії проявляється у кількох напрямках:

- збереження виробів, що більше не випускаються;
- навчальні та освітні цілі;
- відновлення виробництва у критичних галузях, наприклад, у сфері оборонної промисловості або інфраструктури.

«Сіра зона» етики виникає при створенні копій для продажу без внесення інноваційного внеску. Навіть якщо юридично довести порушення складно, таке використання вважається неетичним, оскільки не приносить суспільної користі та порушує принципи чесної конкуренції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна література

1. Confalone, Gary C.; Smits, John; Kinnare, Thomas. *3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction*. Wiley, 2023. ISBN 978-1-119-75851-8.
2. Messler, Robert W. Jr. *Reverse Engineering: Mechanisms, Structures, Systems & Materials*. McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0071825160.
3. Vikram Sharma, Vikrant Sharma, Om Ji Shukla. *Principles and Practices of CAD/CAM*. Chapman & Hall, 2024. ISBN 978-1-032-38781-9.
4. Liu, Shan; Zhang, Min; Kadam, Pranav; Kuo, C.-C. Jay. *3D Point Cloud Analysis: Traditional, Deep Learning, and Explainable Machine Learning Methods*. Springer, 2021. ISBN 978-3-030-89179-4

Допоміжна література

1. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Клак Ю.В. Інженерна графіка в SolidWorks : Навчальний посібник. Луцьк : Вежа, 2018.
2. Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. *Комп'ютерна графіка: SolidWorks : навч. посібник*. Херсон : Олді-плюс, 2018.
3. Gao, Wei; Li, Ge; Wen, Gao. *Point Cloud Compression: Technologies and Standardization*. Springer Singapore, 2024. ISBN 978-981-97-1957-0.
4. Towards Optimal Point Cloud Processing for 3D Reconstruction — Guoxiang Zhang, YangQuan Chen. SpringerBriefs, 2022.