

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

## Пояснювальна записка

ДО \_\_\_\_\_ кваліфікаційної роботи  
(тип кваліфікаційної роботи)

\_\_\_\_\_ магістра  
(освітній ступінь)

на тему «Дослідження геометричної точності авіаційних деталей за  
методами сталого та звичайного реверс-інжинірингу»

ХАІ.104.163н.24В.134.10695861 ПЗ

Виконав: здобувач(ка) 2 курсу групи №163н  
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»  
(код та найменування)

Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетно-  
космічна техніка»  
(код та найменування)

Освітня програма «Технології виробництва та  
ремонт літальних апаратів»  
(найменування)

\_\_\_\_\_ Сітнікова Я.В.  
(прізвище та ініціали здобувача (ки))

Керівник: \_\_\_\_\_ Катерина МАЙОРОВА  
(ім'я та прізвище)

Рецензент: \_\_\_\_\_ Віталій БОЧАРОВ  
(ім'я та прізвище)

Харків – 2024

Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет \_\_\_\_\_ літакобудування \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ технології виробництва літальних апаратів \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Галузь знань \_\_\_\_\_ 13 «Механічна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код та найменування)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» \_\_\_\_\_  
(код та найменування)

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Технології виробництва та ремонту літальних апаратів» \_\_\_\_\_  
(найменування)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ Катерина МАЙОРОВА \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

\_\_\_\_\_ Сітнікова Яна Валеріївна \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Дослідження геометричної точності авіаційних деталей за методами сталого та звичайного реверс-інжинірингу»  
керівник кваліфікаційної роботи Майорова Катерина Володимирівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 555-уч від « 22 » 04 2024 року

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ 16.06. 2024 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики; літературний огляд та патентний пошук на тему кваліфікаційної роботи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) аналіз впровадження реверс-інжинірингу в існуючі налагоджені системи виробництва при підтримці ЖЦВ та надано аналіз поступового переходу від плазово-шаблонних технологій в цифрові за допомогою реверс-інжинірингу; аналіз існуючих алгоритмів і підходів щодо створення АЕ/ЕМ та оброблення портретів – хмар точок на базі звичайного та сталого реверс-інжинірингу; методологію сталого реверс-інжинірингу та виконано порівняння зі звичайним.

5. Перелік графічного матеріалу Графічний матеріал завданням не передбачено.

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Конструкторський розділ	Капітанова Л.В., проф., д.т.н., доцент	22.04.24	04.05.24
Технологічний розділ	Майорова К.В., зав. каф.104	26.04.24	16.05.24
Економічний розділ	Майорова К.В., зав. каф.104	28.04.24	28.05.24
Спеціальний розділ	Майорова К.В., зав. каф.104	29.04.24	09.06.24

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Катерина МАЙОРОВА « 14 » 06 20 24 р.  
(підпис) (ім'я та прізвище)

7. Дата видачі завдання « 22 » 04 20 24 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ВИРОБУ ТА ЙОГО ПІДТРИМКА	06.05.2024	
2	ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ГЕОМЕТРИЧНА ТОЧНІСТЬ	16.05.2024	
3	СТАЛИЙ І ЗВИЧАЙНИЙ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГ	27.05.2024	
4	РОТОТИПУВАННЯ ЗА МЕТОДАМИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА	10.06.2024	

Здобувач

\_\_\_\_\_  
(підпис)Сітнікова Я.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)Катерина МАЙОРОВА  
(ім'я та прізвище)

### Анотація

У кваліфікаційній роботі представлено дослідження геометричної точності авіаційних деталей за методами сталого та звичайного реверс-інжинірингу.

В даній роботі опрацьовано тему, проведено аналіз та порівняні методи сталого та звичайного реверс-інжинірингу, адитивних технологій, виконано синтез і аналіз тенденцій вітчизняного авіаційного виробництва. Визначені поняття сталого реверс-інжинірингу і звичайного та випадки їх використання з встановленням різниці між ними.

Наведено аналіз технологічної системи сталого реверс-інжинірингу об'єктів і складових частин техніки транспортної категорії для забезпечення складників якості на протязі життєвого циклу виробу. За результатами досліджень надано технологічні рекомендації щодо використання реверс-інжинірингу при виробництві авіаційних деталей, що може бути корисним і для деталей загального машинобудування.

## Зміст

Анотація .....	2
ВСТУП.....	4
1. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ВИРОБУ ТА ЙОГО ПІДТРИМКА .....	5
1.1. Інформаційний супровід виробництва авіаційних деталей та виробів .....	5
1.2 Аналіз тенденцій ЖЦВ та впровадження реверс-інжинірингу.....	14
1.3 Вирішення прямого та зворотного завдань за допомогою реверс-інжинірингу при забезпеченні ЖЦВ .....	16
1.3 Висновки до розділу 1 .....	20
2 ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ГЕОМЕТРИЧНА ТОЧНІСТЬ .....	21
2.1 Причини виникнення похибок та статистичні параметри розсіювання....	21
2.2 Методика розрахунку імовірного відсотку браку і точність форми і розташування поверхонь .....	23
2.3 Позначення точності форми і розташування поверхонь на кресленнях	27
2.4 Шорсткість поверхонь та відхилення.....	33
2.5 Формоутворення якості поверхонь деталей.....	35
2.6 Висновки до розділу 2 .....	37
3. СТАЛИЙ І ЗВИЧАЙНИЙ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГ .....	38
3.1 Сталий реверс-інжиніринг .....	38
3.2 Методологія сталого реверс-інжинірингу.....	42
3.3 Порівняння сталого та звичайного реверс-інжинірингу .....	43
3.3 Висновки до розділу 3 .....	46
4 ПРОТОТИПУВАННЯ ЗА МЕТОДАМИ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА .....	47
4.1 Адитивне виробництво в системі швидкого виробництва АД .....	47
4.2. Зв'язок адитивного виробництва та реверс-інжинірингу .....	50
4.3 Реверс-інжиніринг дослідної деталі та аналіз за його двома методами ....	54
4.4 Висновки до розділу 4.....	60
ВИСНОВКИ .....	61
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	62

## ВСТУП

Враховуючи швидкий розвиток технологій та постійне зростання складності систем, зворотний інжиніринг – reverse engineering – реверс-інжиніринг продовжує набувати значення в сучасному технологічному ландшафті.

Існуючі та нові підходи в реверс-інжинірингу сприятимуть подальшому прогресу, розвитку та взаємодії між різними галузями, відкриваючи нові можливості для відкриття та інтеграції знань.

Реверс-інжиніринг – це спосіб дослідження та розуміння, як працює певний об'єкт, система або пристрій, шляхом його розбирання на складові частини та аналізу їх взаємодії.

Метою кваліфікаційної роботи є забезпечення геометричної точності авіаційних деталей з використанням методів реверс-інжинірингу: сталого та звичайного.

Предмет дослідження: сталий та звичайний реверс-інжиніринг авіаційних деталей.

Задачі дослідження:

1. Визначення життєвого циклу деталі та виробу в цілому, реалізація інформаційного супровіду та підтримки. Особливості впровадження реверс-інжинірингу та вирішення прямої та зворотної завдань при забезпеченні життєвого циклу деталі та виробу.

2. Огляд параметрів якості поверхонь деталей та визначення геометричної точності авіаційних деталей.

3. Аналіз сталого та звичайного методів реверс-інжинірингу.

4. Огляд прототипування дослідної деталі за двома методами сталого та звичайного реверс-інжинірингу на прикладі інженерних задач адитивного виробництва.

## **1. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ВИРОБУ ТА ЙОГО ПІДТРИМКА**

### **1.1. Інформаційний супровід виробництва авіаційних деталей та виробів**

Інформаційний супровід виробництва авіаційних деталей (АД) та авіаційних виробів (АВ) безпосередньо залежить від повноти опису виробу в електронному вигляді, від технічних можливостей устаткування і наявності ресурсів для підтримки АД – матеріальних, людських та іншого роду ресурсів, необхідних для функціонування та обслуговування виробів протягом усього життєвого циклу виробу (ЖЦВ).

При цьому опис виробу виробництва реалізується з використанням інструментарію аналітичної винятково в середовищі CAD/CAM-систем і, відповідно, супровід ЖЦВ АД реалізується із залученням тільки такої інформації. Для авіаційно-космічної галузі ЖЦВ – це сукупність взаємопов'язаних у часі (від початку дослідження та обґрунтування розроблення до закінчення експлуатації виробу) процесів послідовної зміни стану літального апарата (ЛА) [1, 2]. До цих процесів відносять: концепцію виробу та організацію управління проектом, техніко-економічне обґрунтування доцільності створення ЛА, включно з науково-дослідними роботами, дослідно-конструкторськими розробленнями, підготовкою виробництва та організацією серійного виробництва, сертифікацією виробу, експлуатацією, модернізацією, капітальним ремонтом, демонтажем та утилізацією на основі комп'ютерних технологій [3].

Для замовника авіаційної техніки (або експлуатуючої організації) дуже важливим є такі параметри:

- придатність виробу до підтримки, міра повноти надання ресурсів;
- міра повноти надання ресурсів, необхідних для його функціонування та технічного обслуговування;
- повнота опису виробу, який має відповідати вимогам підтримки функціонування та гармоніювати з концепцією конструкції виробу;
- забезпечення обладнанням підтримки виробів (мобільне та стаціонарне).

Сюди входить устаткування з підготовки до застосування та проведення технічного обслуговування, інструментальне, метрологічне та калібрувальне устаткування, ресурси зв'язку, випробувальне устаткування, у тому числі автоматизоване з програмним забезпеченням як вбудованим, так і зовнішнім, а також засоби підтримки допоміжного устаткування; забезпечення виробами, що входять або пов'язані з остаточним виробом (запасні частини, ремонтні комплекти, інструменти, випробувальне обладнання, різні матеріали), які потрібні для функціонування, обслуговування, відновлювального та капітального ремонту; план підтримки льотної придатності виробу - детальний опис системи підтримки, що охоплює кожен елемент логістичної підтримки. Включає більш широке коло обладнання та деталізує функції технічного обслуговування виробів, більш детально, ніж концепція підтримки; ресурси підтримки авіаційних виробів - матеріальні, людські та іншого роду ресурси, необхідні для функціонування та обслуговування виробів протягом усього ЖЦВ.

Таким чином, інформаційний супровід авіаційного виробу має здійснюватися протягом усього його ЖЦВ [4]. У сучасних умовах реалізація інформаційного супроводу авіаційного виробу пов'язана часто з виробами, дата випуску яких відбулася 25-40 років тому. За ці роки відбулися істотні зміни в описі об'єктів виробництва, змінилася і сама мова цих описів. Літальні апарати були вироблені із застосуванням плазово-шаблонного методу ув'язки, а ремонт і конвертація відбувається в умовах комп'ютерного виробництва.

Під час конструювання та супроводу виробництва авіаційних виробів використовують три види математичних моделей геометрії об'єктів: графічну, табличну та аналітичну.

Графічна найбільш поширена на практиці, використовує мову нарисної геометрії та задає форму за допомогою креслення. Ця модель містить у собі всі необхідні розміри для відтворення форми деталі і не потребує проставлення розмірів. Однак, коли точність механооброблення перевищила точність



графіки, ці моделі, щоб не відтворювати їх на кресленні у великих масштабах, і для зручності користування стали оцифровувати (проставляти розміри).

Таблична – задає форму за допомогою таблиці координат точок поверхні.

Аналітична – задає форму за допомогою математичних рівнянь.

При графічному вигляді моделі (в літакобудуванні це зазвичай плаз) не використовується мірильний шкальний інструмент. Математична модель складних просторових форм у плазово-шаблонному методі записується мовою нарисної геометрії. За визначенням плаз – це креслення, виконане на жорсткому носії в масштабі 1:1. Взаємопов'язані між собою плази, шаблони та еталони, майстер-плити і макети стиків є жорсткими носіями геометричних форм і розмірів. З цих жорстких носіїв розміри передаються на робоче оснащення. Розрізняють теоретичні та конструктивні плази.

Теоретичний плаз – плаз із теоретичним кресленням агрегату або вузла літака. На цьому плазі за допомогою геометричних побудов проводиться ув'язка теоретичних обводів агрегату. Розмітка обводів агрегату проводиться або за даними таблиці теоретичних обводів, або за допомогою вимірювальної машини за аналітичними залежностями.

Конструкторський плаз – плаз із конструктивним кресленням цього вузла. На цьому плазі за допомогою геометричних побудов виробляється конструктивна ув'язка між собою деталей і складальних одиниць, що входять до цього вузла, для отримання шаблонів і для отримання обводів шаблонів. Конструктивний плаз створюють на підставі теоретичного плаза і складальних креслень, він може складатися з декількох частин.

Форму складної поверхні за графічної моделі отримують за допомогою шаблонів, які спочатку креслять графічними методами копіювання, а потім або випилюють за допомогою ручних інструментів, або отримують на спеціальному обладнанні. Потім за отриманими шаблонами, застосовуючи копіювальні методи формоутворення, отримують остаточну форму складної поверхні. Первинним носієм реальної форми є шаблони. Сама поверхня за такої

технології її отримання є вторинною. Шаблони виконують роль еталонів поверхні. Якщо бути точним, то шаблони є еталонами перерізу поверхні.

Перевага графічної моделі полягає насамперед у її доволі простому, хоча й досить громіздкому та трудомісткому отриманні. Усі розміри характерних перерізів поверхні виробу зберігаються в натуральних розмірах. Цей метод не потребує наявності дорогого вимірювального інструменту та його метрологічного забезпечення, створення і зберігання еталонів міри (метра, фута тощо) і пов'язаних із ними метрологічних служб.

Недоліком графічної моделі є неможливість її застосування в різних інженерних розрахунках (міцність, аеродинаміка, температурні поля тощо), які сьогодні виконують переважно чисельними, а не графічними методами розрахунку.

Таблична модель задає точки поверхні виробу за допомогою трьох чисельних значень декартових координат. Така модель може бути використана під час отримання заданої форми на верстатах із ЧПК, формуючи порядок руху ріжучого інструменту по точках поверхні, визначених у таблиці. Точність відтворення поверхні залежить від порядку чисел, що визначають координати точок поверхні, так і від відстаней між точками.

Перевага табличної моделі в простому способі отримання за нею керуючої програми для верстата з ЧПК. Практично основною складністю створення керуючої програми за графічною моделлю виробу є отримання точного опису оброблюваної поверхні в табличному вигляді.

Недоліком табличної моделі є дискретність завдання точок поверхні, що тягне за собою невідомість, невизначеність поверхні в околиці табличної точки. Цей недолік аналогічний недоліку завдання поверхні плазовими перерізами.

Аналітична модель, як і таблична, задає точки поверхні виробу, але на відміну від табличної не безпосередньо координати, а співвідношення між ними. Ці співвідношення дають змогу отримувати не тільки координати точок, а й похідні, радіуси кривизни та інші геометричні характеристики поверхні. Аналітична модель поверхні є найбільш інформативною з розглянутих вище.

Перевага аналітичної моделі в простому і досить легкому способі отримання моделі в будь-якому вигляді. Причому, табличну можна отримати з будь-якою густиною розташування точок на поверхні, а для побудови графічної можна скористатися графопобудівником для паперового носія інформації або відповідним програмним продуктам для візуалізації геометрії в комп'ютерному середовищі. Недоліком аналітичної моделі є складність уявного сприйняття описуваного об'єкта безпосередньо за зовнішнім виглядом самих залежностей.

Якщо 50 років тому переважали графічні методи розроблення та супроводу авіаційних виробів на всіх етапах їхнього життєвого циклу, то з розвитком обчислювальної техніки розширилося застосування табличних методів для опису складнопрофільних поверхонь агрегатів і розроблення керівних програм для їхнього виготовлення на устаткуванні з ЧПК. 20-25 років тому на всіх вітчизняних авіабудівних організаціях почали експлуатувати CAD/CAM-системи. При цьому опис об'єктів виробництва реалізується з використанням інструментарію аналітичної геометрії. Сьогодні всі нові розробки виконуються виключно в середовищі CAD/CAM-систем і, відповідно, супровід РКД реалізується із залученням тільки такої інформації.

Аналітична геометрія заснована на теорії сплайн-функцій [5]. Сплайн являє собою кусково-аналітичну функцію, шматки якої з'єднуються між собою в деяких точках, які називаються вузлами, причому функція у вузлах задовольняє певним умовам. Основна відмінність сплайнового підходу в тому, що якщо в теорії кусково-аналітичних функцій основна увага приділялася вивченню аналітичного шматка, то в сплайнах основна увага приділяється умовам стикування (зшивання) цих аналітичних шматків.

Математичні моделі об'єктів у сплайнових геометріях являють собою набір рівнянь і нерівностей і перетворюються в комп'ютері за допомогою досить складних програм і різних технічних рішень. Основними ознаками матмоделі є наявність у неї трьох типів характеристик: геометрії; сукупності поверхневих матеріальних (фізико-хімічних) параметрів, що залежать від точки вимірювання на поверхні деталі, та групи інших об'ємних матеріальних параметрів [6].

Сукупність формул і умов, що описують геометрію об'єкта в комп'ютерній системі назовемо аналітичним еталоном (АЕ) його геометрії. Модель збірки може бути реалізована в CAD/CAE середовищі, що забезпечує формування відповідних систем координат всієї збірки і кожної вхідної деталі для орієнтації їх у просторі з метою виконання розрахунку необхідних характеристик кожної з них. Для опису зібраного об'єкта виробництва використовується поняття аналітичний еталон збірки (вузла, агрегату, виробу), який містить у собі (рис. 1.1) [7-8]:

- модель системи координат збірки;
- склад виробу та його структуру;
- координати АЕ кожної деталі та їх орієнтацію відносно системи координат збірки;
- посилання на АЕ деталей (АЕд).

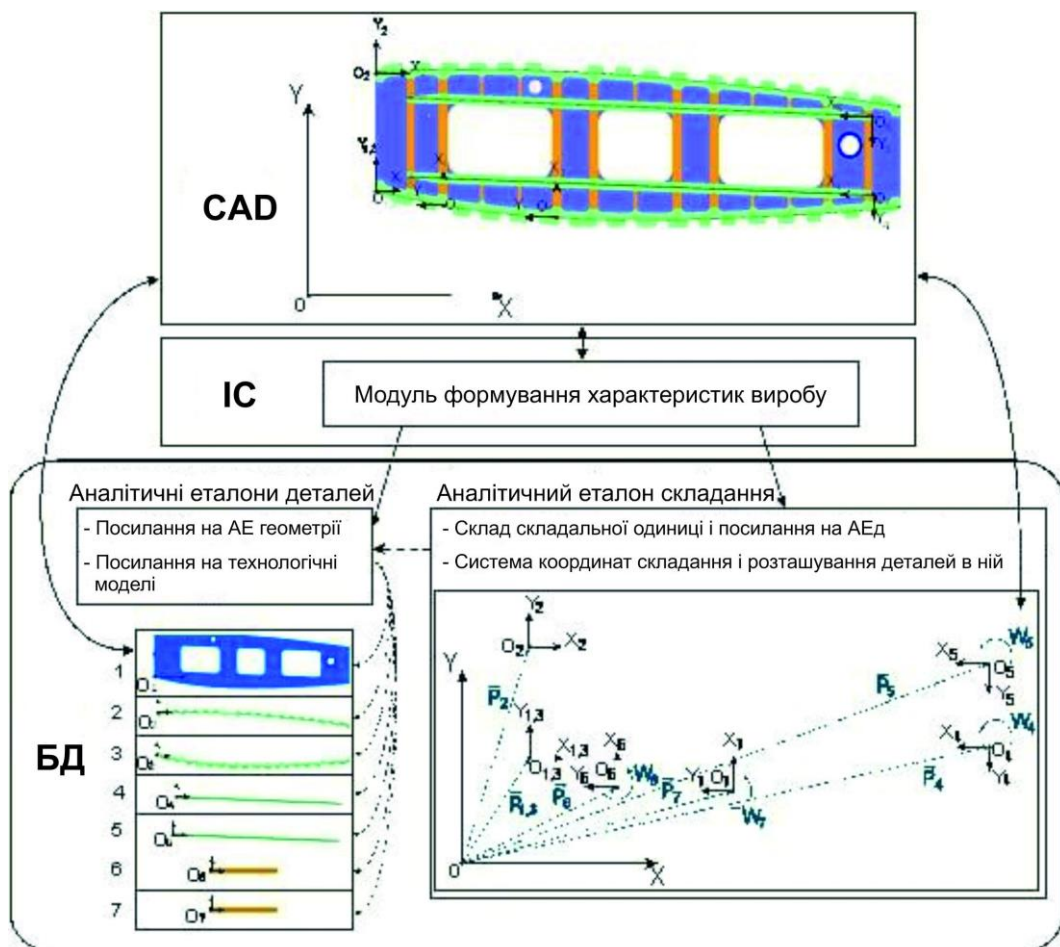


Рисунок 1.1 – Зображення аналітичного еталона збірки на прикладі нервюри [9]

Для виключення дублювання інформації в базі даних організовано зберігання тільки АЕ оригінальних деталей. Завдяки застосуванню посилань забезпечується ефективна робота при внесенні змін у конструкцію деталей і збірок.

Як було зазначено вище, інформаційне забезпечення виробництва на базі мови нарисної геометрії передбачає використання плазів під час пов'язування деталей і вузлів, а під час їхнього виготовлення та контролю геометрії застосовують шаблони. Сама процедура контролю являє собою порівняння двох матеріальних об'єктів: шаблону і, як правило, якоїсь поверхні виробу.

Результат такого порівняння оцінює виконавець робіт або контролер, виходячи зі своїх суб'єктивних умовиводів, які базуються на його кваліфікації, виробничих інструкціях і дисциплінованості. Дуже часто результати контролю фіксують, як правило за складних профілів поверхні виробів, у відповідних документах одним із двох визначень: придатний або негідний. Відсутність чисельних параметрів відхилення від еталона виробу під час виготовлення негативно впливає на оцінку якості виготовлення і можливості подальших досліджень причин неприпустимих відхилення від еталона.

Основне призначення аналітичного еталона (АЕ) деталі – надання повної і достатньої інформації для її випуску серійним виробництвом. Після виготовлення деталі необхідно оцінити ступінь її відповідності еталону.

Відхилення деталі від свого еталона може бути оцінено величиною відрізка нормалі до поверхні еталона до його перетину з поверхнею деталі. Для виконання цієї процедури необхідно побудувати модель, що описує геометрію реальної деталі або окремого її фрагмента, після чого з'являється можливість виконання процедури порівняння з еталоном.

Формування такої математичної моделі геометрії деталі багато в чому визначається вибором мови її опису. Якщо для цього обрано мову аналітичної геометрії, то і математична модель готового виробу також має бути описана цією ж мовою. Інакше виконати процедуру порівняння двох моделей

неможливо. Така модель має описувати реальну деталь, тому вона названа портретом, а її відхилення від свого еталона - похибкою формоутворення.

Таким чином, носієм геометричної інформації про реальний виріб є його математичний портрет мовою аналітичної геометрії.

Формування геометричної моделі деталі, що має поверхні, відмінні від площин і найпростіших тіл обертання, можливе лише наближено. Одним із методів може бути отримання координат деякої представницької множини точок цієї поверхні з подальшим наближенням її сплайн-функціями. Завдання апроксимації точково-заданої поверхні сплайн-функціями з достатньою для практики точністю може бути вирішене з використанням CAD/CAM-систем. Оскільки портрет виробу формується за результатами контрольних вимірювальних операцій, то необхідно звернути увагу на отримання цих значень і методи їх обробки. Це, наприклад, комплекс вимог до умов проведення вимірювань для отримання координат точок поверхонь виробу в умовах його виробництва: вибір вимірювальних систем та інструменту, відповідного метрологічного, математичного та методологічного супроводу. Вибір виду математичних залежностей моделі слід виконувати на ранніх стадіях розв'язання цієї задачі, при цьому не можна нехтувати вимогами щодо точності моделі, зручності її використання під час розв'язання конкретних виробничих задач, кваліфікації працівників серійного авіабудівного підприємства.

Наступна група процедур стосується формування умов проведення вимірювань реальної деталі (виробу). Серед вимог до форми виготовленої деталі важливе значення, наприклад, відіграє врахування особливостей форм деталей, що сполучаються з нею. Тому алгоритм вимірювань має враховувати наявність особливих точок, ліній і поверхонь, точність відтворення і розташування яких суттєво впливає на функціонування деталі (агрегату) у складі виробу, що дає змогу правильно спроектувати технологічну операцію контролю форми і розмірів деталі.

Потім йдуть процедури безпосереднього виконання технологічного процесу контролю деталі в умовах виробництва. У цих процедурах, крім підготовки самої деталі і всього вимірювального комплексу для проведення технологічного процесу автоматизованого контролю деталі зі складною поверхнею, необхідно особливу увагу приділити форматам запису результатів контролю і способам їх фіксації. На завершення необхідно виконати процедури обробки результатів вимірювань, за результатами яких може бути отримано аналітичний портрет реальної деталі.

Таким чином, сукупність формул і умов, що описують геометрію реального об'єкта або його фрагмента, якість його поверхні та властивості матеріалу в комп'ютерній системі з метою виконання процедур контролю, названо аналітичним портретом деталі.

Об'єднання наведеної сукупності моделей одним поняттям дає змогу цю інформацію представити у вигляді єдиного об'єкта інформаційного простору підприємства, що значно спрощує виконання процедур контролю, зберігання та пошуку інформації.

Як було описано вище, виконання будь-яких процесів, пов'язаних з експлуатацією авіаційних виробів, має супроводжуватися інформаційною підтримкою. Наявність на сучасному етапі розвитку авіаційної техніки щонайменше двох мов їхнього опису призводить до певних труднощів реалізації експлуатації таких виробів. Різко зростає трудомісткість інформаційного супроводу процесів, оскільки доводиться, крім отримання інформації з CAD/CAM-систем, вести супровід виробів у вигляді їхньої креслярської документації. Перехід від однієї мови до іншої вимагає певної кваліфікації виконавців, додаткове обладнання, що також веде до значних витрат.

Наявність АЕ деталей і збірок в інформаційному просторі дає змогу істотно знизити як трудомісткість формування моделей, так і об'єм пам'яті, необхідний для її зберігання протягом усього ЖЦВ.

## 1.2 Аналіз тенденцій ЖЦВ та впровадження реверс-інжинірингу

Прогрес авіаційної науки і техніки останніми роками дозволив створити літальні апарати (ЛА), здатні літати з гіперзвуковими швидкостями, перевозити на міжконтинентальних магістралях понад 500 пасажирів, піднімати у повітря понад 200 т вантажів, здійснювати польоти у складних метеоумовах та здійснювати посадку без участі пілота.

Наразі замовлення для українських авіабудівних заводів на ЛА цивільної авіації мають одиничний характер, що призводить до частої змінності об'єктів виробництва. Ці обставини впливають на структуру технологічної підготовки виробництва, на всі технологічні процеси, у тому числі на складальні роботи, методи та схеми збирання, схеми ув'язування складових частин (СЧ) ЛА, заготівельної та складальної оснастки, а також в цілому на підтримку ЖЦВ. Це призводить до значних модифікацій конструкцій у процесі виробництва, що вимагає заміни або доопрацювання конструктивно-складних, трудомістких та металомістких складальних пристосувань (СП). Тому, не зважаючи на високу потребу в ЛА цивільної авіації, замовлення на них мають тривалий термін виконання через те, що вітчизняний виробник не може забезпечити програму випуску з високою якістю та у найкоротші терміни через недостатній рівень процесів підготовки виробництва.

Легкі літаки і вертольоти характеризуються порівняно невеликими обсягами випуску при надзвичайно широкій номенклатурі складальних одиниць (СО) та деталей, в той же час для них характерна обмежена кількість СО при порівняно високих обсягах випуску та великій кількості модифікацій. Крім того, в останні роки набуло широкого застосування технології модернізації або конвертації літаків та гелікоптерів, що потребує розробки нових методів проектування виробів, а також удосконалення технології підготовки виробництва та виробництва таких виробів.

При модернізації та конвертації виробів виникла проблема переведення виробів, отриманих плазово-шаблонним методом (ПШМ), у програмне уявлення, звичне для сучасного виробництва. Оскільки похибки ПШМ значно



більші ніж за програмно-інструментальним методом (ПРИМ), підготовка виробництва при модернізації та конвертації стає характерною як для одиничного виробництва, так і для масового.

Одиничне виробництво в авіаційній промисловості характеризується великою трудомісткістю та собівартістю складальних робіт, значною тривалістю виробничого циклу, а також використанням традиційних методів складання та схем ув'язування, які в основному орієнтовані на спеціальні складальні пристрої.

Значна питома вага при виконанні складальних робіт становлять витрати на операції взаємної координації СЧ при їх установці (базуванні та фіксації) у складальному положенні, а також витрати на з'єднання СЧ, виготовлення оснастки другого порядку (наприклад, шаблонів пристроїв ШП, монтажних еталонів МЕ та ін.) і т.п. Ці витрати багато в чому визначаються значним обсягом ручних робіт та залежать від рівня технологічності конструкції, прийнятої схеми членування, схеми та методів збирання, методів забезпечення взаємозамінності.

В даний час удосконалення методу створення СЧ та засобів технологічного оснащення авіаційних конструкцій в умовах дослідного та одиничного виробництва шляхом удосконалення існуючих та розробки нових схем ув'язування та методів складання, здійснюється на базі технології реверс-інжинірингу з програмним управлінням [15].

Реверс-інжиніринг є комплексом технологій, апаратних і програмних засобів, необхідних для створення властивостей об'єкта. Спочатку він виник як зворотний інжиніринг з методу створення копії при виникненні потреби в заміні зношеної деталі або знятої з виробництва. Наприклад, при використанні імпортованих деталей, що поставляються без креслень та технічної документації, або у разі втрати креслень. Можна вважати, що реінжиніринг – це простий і найменш витратний шлях у порівнянні з покупкою нової деталі або розробкою з нуля. Безперечним плюсом даного методу можна вважати створення точної копії деталі для підтримки працездатності об'єкта, зберігання інформації та

швидкого створення електронної моделі (ЕМ). З часом основною метою технологію реверс-інжинірингу стало отримання саме ЕМ, що відповідає певним вимогам [16].

Дана технологія дозволяє якісніше відтворити еталон, тобто з мінімальними втратами на відміну від робітника, який доопрацює та впише виріб за місцем. Не варто забувати про операції контролю, де принципи технології реінжинірингу використовують досить широко [17].

Вагомим достоїнством технології реверс-інжинірингу є повна адаптованість до інтегрованих інформаційних середовищ, які охоплюють всі етапи життєвого циклу авіаційного об'єкта, а саме до: CAD/CAM/CAE-систем та CALS-технологій (Continuous Acquisition and Life cycle Support – безперервна інформаційна підтримка поставок та життєвого).

Мінусом реверс-інжинірингу можна вважати дороге обладнання та програмне забезпечення, а також складності при пошуку фахівців у цій галузі, оскільки технологія для нашої країни нова і підготовкою кадрів найчастіше займаються комерційні компанії при продажу спеціалізованого обладнання.

### **1.3 Вирішення прямого та зворотного завдань за допомогою реверс-інжинірингу при забезпеченні ЖЦВ**

Забезпечення ЖЦВ – це формування та виконання всіх складників якості об'єкту і складових частин техніки транспортної категорії, які утворюються на стадіях проектування та конструювання, технологічної підготовки виробництва, безпосередньо виробництва та експлуатації (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Складники якості об'єкту і складових частин техніки транспортної категорії

Формування показників якості АД та виробу залежать від їх опису в САД-системах, а саме від аналітичного еталону (АЕ). АЕ будується за сплайновою геометрією та включає дані властивостей, маси, об'єму, координати центру ваги та ін., але не відображає характеристики якості матеріалу. Тому на основі АЕ створюють окремі електронні моделі (ЕМ), наприклад ЕМ геометрії поверхні та допуску макровідхилення, ЕМ геометрії крайок деталі і допусків на відхилення, ЕМ мікрорельєфу поверхні деталі (шорсткість та хвилястість) і крайок, ЕМ властивостей деталі, її поверхонь та крайок та ін. Всі ЕМ в САД-системах відрізняють за кольором та фактурою з присвоєнням відповідних значень. Такий підхід забезпечує однозначне сприйняття інформації на всіх стадіях ЖЦВ. Однак трудомісткість зі створенням ЕМ та АЕ в порівнянні з внесенням інформації при формуванні моделей значно перебільшує та вимагає високої кваліфікації виконавців. Зменшення трудомісткості буде залежати від кратності використання АЕ в процесі супроводження виготовлення та експлуатації виробу.

Створення АД та АВ за їх відповідним АЕ реалізує пряму задачу формоутворення, а створення АЕ з реально фізично існуючого виробу – реалізує зворотну задачу формоутворення. Відома в світі технологія реверс-інжинірингу застосовується на всіх задачах формоутворення, а саме: для контролю на етапах виготовлення шляхом порівняння відсканованих поверхонь дослідного об'єкту – портретів (П) – з його існуючим АЕ/ЕМ та для побудови АЕ на базі отриманого П з реально фізично існуючого виробу, коли існує нестача або повна відсутність конструкторської документації. Таким чином, головною метою реінжинірингу є створення цифрової геометрії об'єкту і складових частин для підтримки його ЖЦВ. Точність створення такої геометрії напряму залежить від складності використовуваних пристроїв (сканер, координатно-вимірювальна машина, трекер, портативна рука), їх обчислювальної потужності та рівня кваліфікації робітника, що в свою чергу формує показники трудомісткості і вартість виробу.

На сьогодні виробники стикаються з такою проблемою як поява відхилення у геометрії і властивостях АЕ та створеної по ньому ЕМ. Це пояснюється наступним. По-перше, в технології реверс-інжинірингу використовуються різні пристрої та програмні додатки до них. По-друге, відсутня єдина система координат для дослідного об'єкту, в результаті чого при переході в програмних додатках губиться інформація. По-третє, на сьогодні не існує єдиного уявлення поверхонь, які задовольняють всім вимогам інженерних задач. У сучасному виробничому світі існує безліч методів уявлення геометрії поверхонь – це RBF-функції, В-сплайни, Т-сплайни, ТНВ-сплайни та ін., а також різні інженерні додатки, наприклад, MISTRAL для програмного продукту CATIA v5 (Іспанія), Smart Inspection Tools (Італія) та ін., що використовуються для оптимізації тривимірних форм. Всі ці методи мають переваги один перед одним і не гарантують, що результуюча параметрична поверхність П буде мати гладку сітку хмар точок (ХТ) (файл «\*.stl»), що призводить до додаткового етапу відбудови АЕ. Слід зауважити, що всі додаткові етапи з відтворення АЕ/ЕМ або уточнення ХТ також збільшують

трудомісткість і вартість виробу в цілому.

Подальші дослідження розвинули технологію реверс-інжинірингу у стабільний реверс-інжиніринг, де застосовується лише сітка ХТ «\*.stl», оминаючи етап створення ЕМ. Основним недоліком такого підходу є складність забезпечення гладкої і нерозривної сітки ХТ особливо в місцях перетину поверхонь, кутах і місцях виступів, а також, як і в звичайному реверс-інжинірингу, узгодження з програмами CAD/ CAE / CAM -систем із-за відсутності єдиної системи координат. Використання стабільного реверс-інжинірингу надасть зменшення трудомісткості, але підтвердженнь та апробації цьому майже немає і питання на даний час лишається відкритим.

Перспективність розвитку такої технологічної системи з використанням стабільного реверс-інжинірингу відповідає реалізації мети 12 Організації Об'єднаних Націй із необхідності забезпечення стійких моделей використання та виробництва до 2030 року шляхом зміни показників ефективності використання матеріалів та енергії, а також підтверджується викликаним інтересом до неї виробників Польщі, Південної Кореї, Франції та ін. країн. Однак, на жаль на сьогодні немає повної її апробації особливо в надсучасних адитивних технологіях в CAD/CAM/CAE-системах. Малодослідженими в цьому напрямку досі лишаються пошкоджені деталі або повністю зруйновані деталі, на які слід створити цифрову геометрію та конструкторську документацію.

Таким чином, враховуючи всесвітні надбання та актуальність досліджень, для розкриття теми кваліфікаційної роботи виникає потреба дослідити параметри геометричної якості поверхонь АД, що впливає на геометричну точність виробу в цілому, а також можливості забезпечення відповідних вимог цих параметрів при використанні сталого та звичайного реверс-інжинірингу, що адаптується в програмах CAD/CAE/CAM-систем на протязі всього ЖЦВ без втрат інформації.

### **1.3 Висновки до розділу 1**

1. Показано інформаційне забезпечення виробництва авіаційних деталей та виробів на протязі всього ЖЦВ.

2. Виконано аналіз впровадження реверс-інжинірингу в існуючі налагоджені системи виробництва при підтримці ЖЦВ та надано аналіз поступового переходу від плазово-шаблонних технологій в цифрові за допомогою реверс-інжинірингу.

3. Розкрито поняття аналітичного еталону деталі та виробу в системі вирішення прямих та зворотних завдань при підтримці ЖЦВ.

## 2 ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ГЕОМЕТРИЧНА ТОЧНІСТЬ

### 2.1 Причини виникнення похибок та статистичні параметри розсіювання

Проектуючи машину, конструктор призначає визначені форму і розміри кожної деталі, що обмежуються комплексом геометричних поверхонь й які забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики. Однак на практиці деталі, оброблені на верстатах, будуть мати відхилення від заданих розмірів і форми. У зв'язку з цим розрізняють *задану*, або *номінальну поверхню*, визначену кресленням, і *дійсну*, або *реальну*, отриману в результаті обробки й обмірювану з припустимою точністю.

*Точність оброблення – це ступінь відповідності дійсних геометричних розмірів параметрам, заданим кресленням, а ступінь невідповідності або відхилення від дійсних параметрів від заданих - це похибка обробки.* Можна сказати, що погрішність – величина, зворотна точності.

Прийнято відхилення геометричних параметрів класифікувати укрупнено:

- 1) відхилення розміру;
- 2) відхилення форми;
- 3) відхилення розташування;
- 4) шорсткість.

*Статистичні параметри розсіювання. Неточності верстата.* Погрішність обробки може бути викликана биттям шпинделя, непрямолінійністю направляючі станини, супорта, робочого столу, непаралельністю і неперпендикулярністю переміщень супорта осі шпинделя, розбіжністю центрів передньої і задньої бабок, зазорами в сполученнях верстаті, неточності елементів, що визначають положення інструмента.

*Неточності інструмента, що ріже.* Найбільш істотні неточності мірного (свердла, зенкери, розгорнення, мітчики, протягання і т.п.) і профільного (фасонні різці і шліфувальні кола, фрези і т.п.) інструмента, тому що вони

прямо і безпосередньо впливають на розмір і форму оброблюваної поверхні і не можуть бути усунуті підналагодженнями.

Для всіх різальних інструментів найбільш істотні погрішності, що виникають у результаті зносу частини, що ріже, тобто розмірний знос інструмента.

*Неточності деталі.* Деталь, що надходить на яку-небудь операцію, має погрішності обробки, що виникли при виконанні попередніх операцій. При з відновленні деталей до цих погрішностей додаються перекручування розмірів і форми, викликані зносом і деформацією в процесі експлуатації. Ці погрішності впливають на точність обробки, що досягається в даній операції.

*Деформації верстата, пристосування, інструмента.*

Пружні деформації, що виникають під дією сил різання у верстаті, пристосуванні, інструменті, можна розділити на деформації в місцях з'єднань – деформації стиків (отжатие шпинделя, столу, супорта і т.п.) і деформації тіла деталей (прогин шпинделя, станини і т.п.). Розміри цих деформацій визначаються твердістю верстата і залежать від його конструкції і якості виготовлення.

*Деформація деталі.* Особливо важливо враховувати деформації при обробці нежорстких деталей: довгих валів, тонкостінних циліндрів, кілець і т.п. У цих випадках погрішності обробки виникають у результаті дії сил затиснення деталі при її закріпленні і сил різання в процесі обробки.

При обробці деталей складної форми з різкими змінами площі перетину (блоки циліндрів, голівки блоку, корпуса коробок передач) особливе значення мають деформації від внутрішніх напружень. При знятті шарів металу рівновага сил внутрішнього напруження матеріалу деталі порушується, і внаслідок перерозподілу напруг форма обробленої поверхні і деталі в цілому може спотворюватися.

*Температурні деформації.* У процесі механічної обробки температура окремих частин верстата. Пристосування, інструмента, деталі змінюються неоднаково. Крім того, матеріали мають різний коефіцієнт лінійного



розширення. У результаті первісне взаємне положення поверхонь порушується, що є причиною виникнення похибок обробки.

*Неточність установки інструмента на розмір.* Безпосередньо на значеннях розміру впливає неточність первісної установки інструмента, що ріже, а також неточність його установки при заміні.

*Неточності виміру розміру.* Неточності виготовлення вимірювального інструмента або приладу, а також неточності, що допускаються при вимірах, 4 завжди є одним із джерел похибок обробки, тому що про її результати ми судимо за результатами вимірів.

Усі ці причини викликають відхилення заданих кресленням параметрів деталі. При обробці партії деталей кожна з причин, що викликають неточності, змінює свій вплив, при переході від однієї деталі до іншої неоднаково. Тобто, отриманий у результаті обробки, є випадкова величина. Тому при рішенні практичних задач використовуються положення теорії імовірностей і математичної статистики.

## **2.2 Методика розрахунку імовірного відсотку браку і точність форми і розташування поверхонь**

Рішення деяких практичних задач доцільно розглянути на прикладі закону нормального розподілу.

Площа, що обмежується кривою нормального розподілу і віссю абсцис (по осі ординат відкладають щільність імовірності  $F(x)$ ), для випадку, коли початок координат збігається із середнім арифметичним значенням визначається рівнянням:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (2.1)$$

У теорії імовірності часто використовують коефіцієнт ризику:

$$t = \frac{x}{\sigma}, \quad (2.2)$$

Якщо замість  $x$  у рівняння ввести коефіцієнт ризику  $t$ , то воно прийме вид:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dx, \quad (2.3)$$

Площа, обмежена кривою нормального розподілу і віссю абсцис, дорівнює імовірності повної сукупності подій, тобто дорівнює одиниці.

При симетричному розташуванні кривої щодо осі  $y$  можна записати:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0.5, \quad (2.3)$$

де  $\Phi(t)$  – площа, обмежена кривою і віссю абсцис у межах інтегрування від 0 до  $\infty$ .

Величина  $\Phi(t)$  називається інтегральною функцією, або нормованою функцією Лапласа.

У загальному виді рівняння виглядає так:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2.4)$$

Крива нормального розподілу в обидва боки наближається до осі абсцис. Для практичних розрахунків необхідно мати обмежене поле розсіювання, що охоплювало б основну масу подій. Оскільки основним параметром розсіювання є середнє квадратичний відхилення  $\sigma$ , то поле розсіювання приймають у межах  $\pm 3\sigma$ . За межами цього поля розсіювання залишається 0,27% подій, що для технічних розрахунків цілком прийнятно (рис. 2.1) Таким чином, поле розсіювання  $V$  дорівнює:

$$V = 6\sigma \quad (2.5)$$

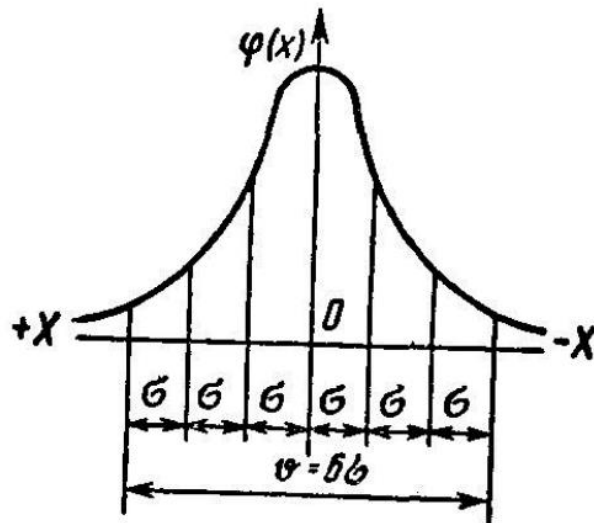


Рисунок 2.1 – Визначення поля розсіювання

Для визначення відсотка браку при виготовленні деталей спочатку визначають коефіцієнт ризику  $t$ . При нормальному розподілі, коли середина поля допуску збігається з центром розсіювання,

$$x = \frac{T_d}{2} \quad (2.6)$$

Якщо у формулу коефіцієнта ризику підставити це значення  $x$  а  $\sigma$  визначити з попереднього рівняння через  $V$ , те одержимо:

$$t = \frac{x}{\sigma} = \frac{T}{2\sigma} = \frac{T}{2\frac{V}{6}} = 3\frac{T}{V}, \quad (2.7)$$

Таким чином, коефіцієнт ризику в цьому випадку показує співвідношення поля допуску і поля розсіювання (рис. 2.2) для технологічних процесів, які мають різну точність і поле розсіювання ( $V_1, V_2, V_3$ ). Коли коефіцієнт ризику дорівнює 3, поле розсіювання  $V_2$  дорівнює полю допуску і браку практично не буде (не більш 0,27%). Якщо ж коефіцієнт ризику більше 3, браку не буде, але процес обробки обраний зайво точним, а отже, більш дорогим.

Коли коефіцієнт ризику менше 3, брак імовірний, і для вибору оптимального технологічного процесу обробки необхідно знати імовірний відсоток браку.

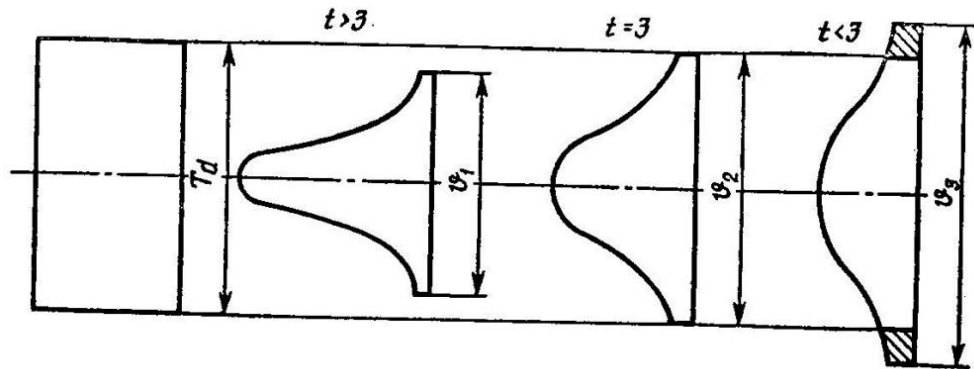


Рисунок 2.2 – Значення коефіцієнта ризику при різних співвідношеннях  $T_d$  і  $V.7$

Зсув центра групування при тій же значенні поля розсіювання призводить до збільшення імовірного відсотка браку.

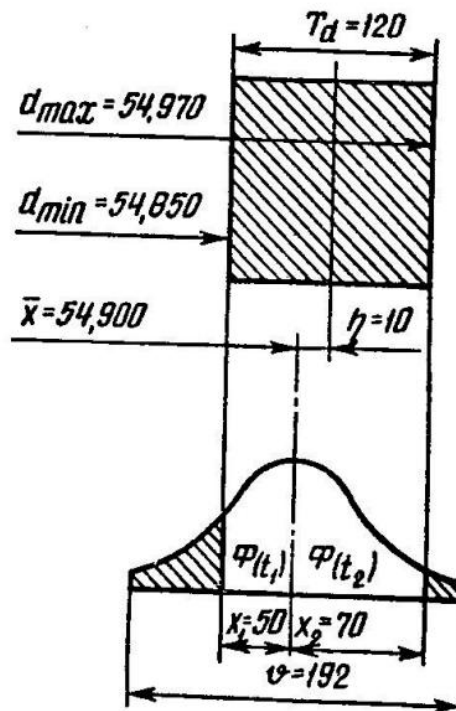


Рисунок 2.3 – Визначення імовірного відсотка браку при зсуванні розташування поля розсіювання

Останнє необхідно враховувати при настроюванні верстатів.

### 2.3 Позначення точності форми і розташування поверхонь на кресленнях

У результаті виникнення погрешностей при обробці дійсні розміри деталей однієї партії розрізняються між собою, тобто відбувається розсіювання розмірів.

*Розсіювання розмірів* – результат впливу великого числа факторів, що не піддаються регулюванню, тому при виготовленні або відновленні великих партій однакових деталей точність виготовлення можна оцінити, використовуючи положення теорії імовірностей і математичної статистики.

Похибки можуть бути систематичними і грубими (промашки).

*Систематичні похибки* сталі за значенням і знаком або закономірно змінні.

Джерелами можуть служити, наприклад, непрямолінійність напрямних верстата, неточність мірного інструмента, неточності виготовлення або настроювання вимірювального інструмента і т.п.

Значення і знак системної похибки можна заздалегідь передбачити і врахувати в тих випадках, коли її неможливо усунути.

*Випадкові похибки* несталі за значенням і знаком. Передбачити заздалегідь їхнє значення і знак у кожному конкретному випадку неможливо, тому що вони не підпорядковані будь-якій закономірності. Джерелом випадкових похибок можуть бути пружні і температурні деформації системи ВПД, неоднорідність механічних властивостей матеріалів, розмір припуску і т.і. Оцінити їх можливо, тільки використовуючи методи теорії імовірностей.

Допуск обов'язково вказується на всі розміри. Якщо не мається на кресленні, незазначені ставляться в технічних вимогах.

*Грубі похибки* виникають при допущенні грубих помилок: улучення стружки під установлену деталь при вимірах, помилки при відліку розподілів на лімбі, вимірювальному інструменті.

Уникнути похибок обробки неможливо, тому при виготовленні або відновленні деталей відхилення геометричних параметрів від заданих обмежують, забезпечуючи більшу чи меншу точність обробки.

**Точність розміру визначається встановленим допуском на обробку.**

Велика кількість факторів і їхній неоднаковий вплив приводить до того, що значення і знак похибки виготовлення або вимірювання передбачити неможливо, тобто похибка випадкова величина. Тому для аналізу похибок обробки або вимірювання використовують положення теорії імовірності і математичної статистики.

Наявність похибок обробки або вимірювання призводить до розсіювання розмірів у партії деталей або результатів вимірювання.

**Точність форми** характеризується відхиленнями форми дійсної поверхні (або профілю) від форми номінальної поверхні (або профілю), заданої кресленням, і визначається відповідно до ГОСТ 24642-81.

**Реальна поверхня** – це поверхня, виготовленої деталі, що обмежує деталь і відокремлює її від навколишнього середовища.

**Номінальна поверхня** – це ідеальна поверхня, форма якої задана кресленням або іншою технічною документацією.

Кількісно відхилення форми оцінюються найбільшою відстанню від крапок дійсної поверхні (профілю) до прилягаючої поверхні (профілю) по нормалі до прилягаючої поверхні (профілю). Відхилення форми можуть бути комплексними і частками (рис. 2.4).

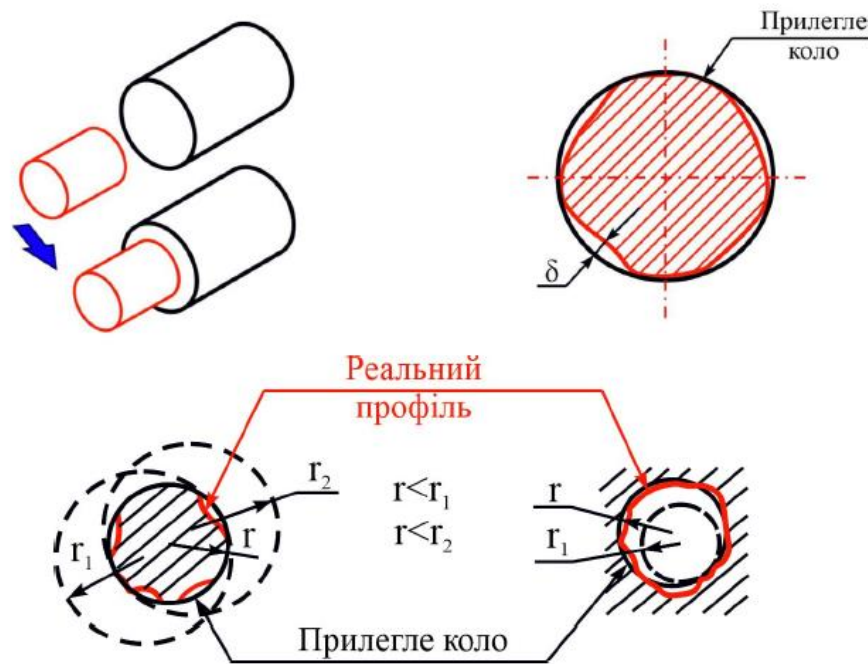


Рисунок 2.4 – Визначення комплексного показника відхилення від циліндричності

Для **циліндричних поверхонь** комплексним є відхилення від циліндричності, що характеризує найбільшу відстань від крапок реальної поверхні до прилягаючого циліндра.

За прилягаючий циліндр приймається циліндр мінімального діаметра, описаний навколо реальної зовнішньої поверхні, або максимального діаметра, вписаний у реальну поверхню.

Комплексним показником відхилення в у площині поперечного переріза є **відхилення від круглості**. Приватними відхиленнями будуть овальність і огранювання.

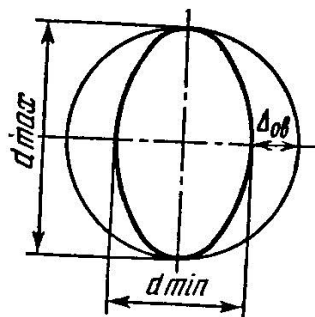


Рисунок 2.5 – Відхилення форми циліндру в поперечному перерізі – овальність

**Овальність** – відхилення від круглоти, при якому реальний профіль поперечного переріза являє собою овалоподібну фігуру, найбільший і найменший діаметри якої знаходяться у взаємоперпендикулярних напрямках. За значення овальності приймають напіврізниця між найбільшим і найменшим діаметрами перетину:

$$\Delta_{ов} = \frac{d_{\delta} - d_{м}}{2} = \Delta_{кр}, \quad (2.8)$$

Овальність виникає в результаті биття шпинделя токарського або шліфувального верстата, через неправильну форму поперечного переріза заготовлі, дисбалансу деталі і т.д.

**Огранювання** – відхилення від круглоти, при якому реальний профіль поперечного переріза являють собою багатогранну фігуру, обкреслену відрізками дуг з центрами кривизни в різних крапках.

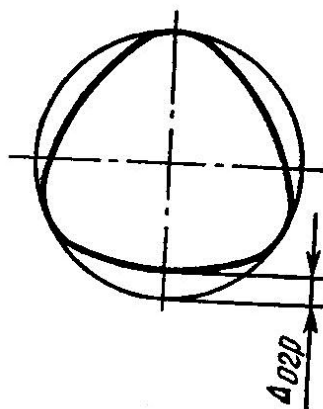


Рисунок 2.6 – Відхилення форми циліндру в поперечному перерізі – огранювання

Огранювання кількісно визначається так само, як і відхилення від круглоти, - найбільшим відхиленням  $\Delta$  реального профілю від прилягаючої окружності.



$$\Delta_{ог} = \Delta_{кр}, \quad (2.9)$$

Причиною появи огранювання є зміна положення миттєвого центра обертання деталі при обробці; огранювання з'являється, як правило, при бесцентровом шліфуванні, при різанні, коли система ВПД недостатня тверда.

Приватними показниками відхилення в профілю циліндричних поверхонь у поздовжньому перетині є конусоподібність, бочкоподібність, сідлоподібність, відхилення від прямолінійності осі.

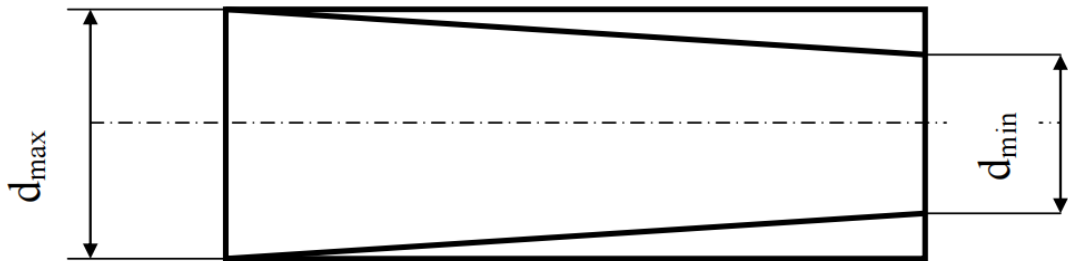


Рисунок 2.7 – Відхилення форми циліндру в поздовжньому перерізі – конусоподібність

**Конусоподібність** – відхилення профілю поздовжнього перерізу, при якому утворюючі прямолінійні, але не рівнобіжні один одному.

$$\Delta_{конус} = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} = \Delta_{прод}, \quad (2.10)$$

Конусоподібність виникає при розбіжності осей шпинделя і пиноли задньої бабки верстата, непаралельності осі шпинделя напрямним станини, швидкому зносі різця і т.п.

**Бочкоподібність** – відхилення профілю поздовжнього перерізу, при якому утворюючі не прямолінійні і діаметри збільшуються від країв до середини перерізу (рис. 3.7):

$$\Delta_{бочк} = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} = \Delta_{прод} \quad (2.11)$$

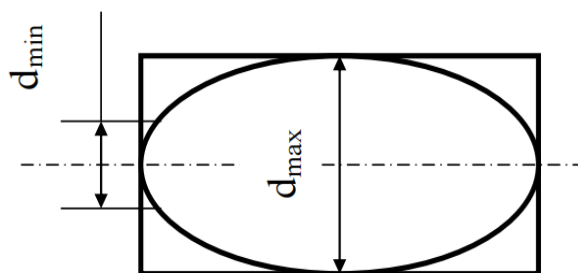


Рисунок 2.8 – Бочкоподібність

Найчастіше причиною бочкоподібності є прогин валу при малій його твердості в процесі обточування в центрах.

**Сідлоподібність (дифузор, корсетна)** – відхилення профілю поздовжнього перерізу, при якому утворюючі не прямолінійні і діаметри зменшуються від країв до середини перерізу (рис. 3.9).

$$\Delta_{сед} = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} = \Delta_{прод} \quad (2.12)$$

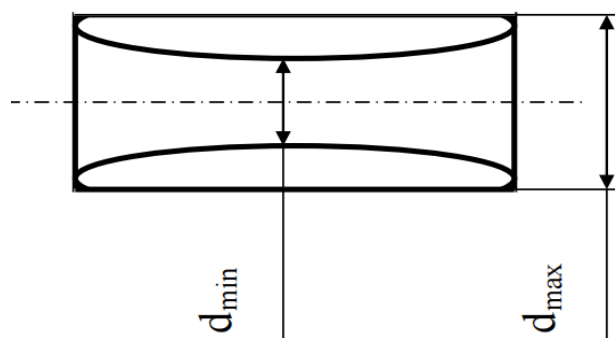


Рисунок 2.9 – Сідлоподібність

Причини виникнення – розбіжність центрів токарського верстата у вертикальній площині або обробка товстих коротких валів у нежорстких центрах.

Знання приватних показників відхилення в профілю дає можливість вносити корективи в технологічний процес і усувати причини зухвалі ці

відбивам, тому що кожне з них знижує ресурс рухливих з'єднань і надійність нерухомих.

## 2.4 Шорсткість поверхонь та відхилення

Для **циліндричних поверхонь** комплексним є відхилення від циліндричності, що характеризує найбільшу відстань від крапок реальної поверхні до прилягаючого циліндра.

Комплексним показником відхилення у площині поперечного перерізу є **відхилення від круглоти**.

**Відхилення від прямолінійності осі** характеризуються непрямолінійністю геометричного місця центрів поперечних перерізів циліндричної поверхні і виникає, як правило, через дію нерівномірно розподілених залишкових напруг, що виникають після термообробки, наклепу і т.п.

**Відхилення від площинності** – комплексний показник відхилення в форми плоских поверхонь. Вони характеризуються сукупністю усіх відхилення в форми поверхні і чисельно дорівнює найвеликій відстані  $\Delta$  від дійсної поверхні.

**Увігнутість і опуклість** – приватні показники відхилення в форми плоских поверхонь.

**Відхилення від прямолінійності** – комплексний показник відхилення в профілю перетину плоских поверхонь. Воно чисельно дорівнює найбільшій відстані від дійсного профілю до прилягаючої прямої.

Усі види відхилення в форми від правильної геометричної форми негативно позначаються на роботі з'єднання. У рухливих з'єднаннях відхилення в форми призводять до зменшення фактичної площі контакту, збільшенню питомих навантажень, погіршенню умов змазування й у результаті до значного скорочення ресурсу з'єднання через швидкий знос поверхонь, що сполучаються. У з'єднаннях з натягом відхилення в форми призводять до зменшення реального натягу і як наслідок до зниження надійності з'єднання.

*Два стандарти нормує шорсткість ДСТУ 2413-94 (Шорсткість поверхні, терміни і визначення) ДСТУ 2409-94 (Вимірювання параметрів шорсткості).*

*Шорсткість поверхні – це сукупність нерівностей профілю поверхні з відносно малими кроками в межах базової довжини  $l$ .*

Середньою лінією профілю  $m$  називається базова лінія, що має форму номінального профілю поверхні і яка поділяє дійсний профіль так, що в межах базової довжини сума квадратів відстаней  $y_1, y_2, \dots, y_n$  крапок профілю до цієї лінії мінімальна.

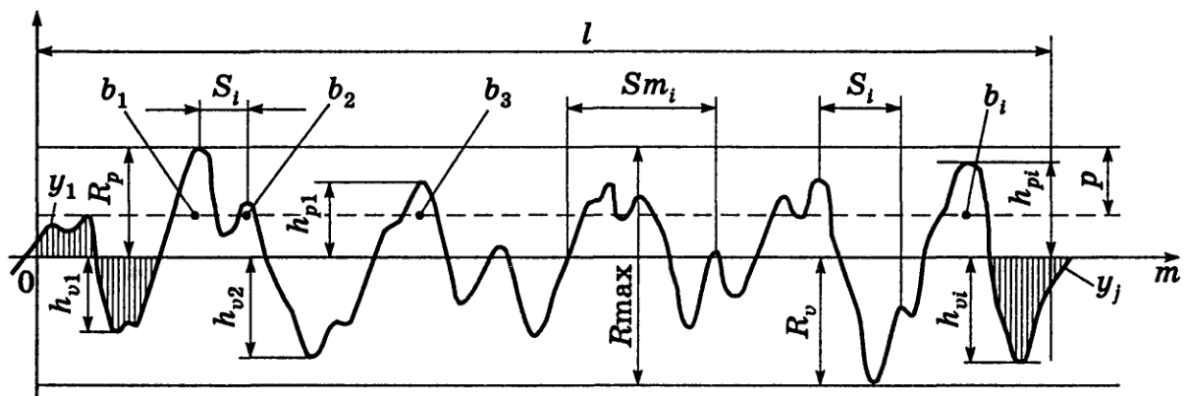


Рисунок 2.10 – До визначення параметрів шорсткості

На профілограмі в межах базової довжини  $l$  площі, розташовані по обидва боки від цієї лінії до контуру профілю, повинні бути рівні між собою.

Кількісну оцінку шорсткості проводять по наступних параметрах:  $R_a$  – середній арифметичний відхилення профілю;  $R_z$  – висота нерівностей профілю;

Середнім арифметичним відхиленням профілю  $R_a$  називається середнє значення відстаней ( $y_1, y_2, \dots, y_n$ ) від крапок обмірюваного профілю до середньої лінії, узятих за абсолютним значенням:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2.13)$$

Висота нерівностей профілю  $R_z$  по десятих крапках – сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших западин профілю в межах базової довжини:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi} \right), \quad (2.13)$$

Зазначимо, що параметр  $R_a$  є переважним, оскільки визначення параметра  $R_z$  пов'язане із вимірами не менше п'яти виступів і западин профілю вздовж базової довжини, що на практиці не завжди можна здійснити. Крім того,  $R_a$  більш точно визначає шорсткість, оскільки є інтегральним, тому шорсткість поверхні найчастіше оцінюють параметром  $R_a$ .

## 2.5 Формоутворення якості поверхонь деталей

Існує понад 50 параметрів якості поверхні деталі та більше 25 параметрів для оцінки її фізико-хімічних властивостей, серед яких: розмір зерен, щільність дислокацій, ступінь деформації, глибина наклепу, ступінь наклепу, мікродеформація ґратки, мікронапруження тощо.

Аналіз результатів проведених досліджень дозволяє видати науково-обґрунтовані рекомендації щодо стандартизації параметрів якості поверхневого шару деталей машин, що представлені на рис. 2.11.



Рисунок 2.11 – Параметри, прийняті визначальними для якості поверхневого шару деталей

Серед них пріоритетне значення мають: для субшорсткості –  $R_{maxc}$ ; для шорсткості –  $R_p$ ,  $S_m$ ; для хвилястості –  $h_w$ ,  $S_w$ ; для макровідхилень –  $H_{max}$ ; для фізико-механічних властивостей –  $H_{\mu 0}$ ,  $h_{\mu 0}$ ,  $\sigma_T$ . Всі вони описуються ще на стадії створення АЕ деталі та виробу та є вирішальними при прийнятті рішення пропуску деталі у виробництво на етапах контролю.

Термін «аналітичний еталон/електронна модель» – зв’язне тверде тіло, що має задану сукупність властивостей та які отримано в результаті виконання операції технологічного процесу. Прийнято такі основні ознаки цієї моделі як наявність у неї двох типів характеристик:

1) геометрії – одним або декількома рівняннями поверхні:

$$F_A(X_{ГД}, Y_{ГД}, Z_{ГД}) = 0, \quad (2.14)$$

в єдиній системі координат  $(0, X, Y, Z)$ , яка міцно зв’язана з твердим тілом  $(X_{ГД}, Y_{ГД}, Z_{ГД}$  – координати граничних точок деталі);

2) сукупності поверхневих матеріальних (фізико-хімічних) параметрів, що залежать від точки вимірювання на поверхні деталі:

$$\alpha_{iД} = \alpha_{iД}(X_{ГД}, Y_{ГД}, Z_{ГД}), \quad (2.15)$$

де  $i$  – умовний номер поверхневого параметру, наприклад, твердості;

Під терміном «поверхня деталі» прийнято поверхню, що обмежує деталь і відокремлює її від довкілля – реальна поверхня. Ця поверхня утворюється у процесі її виготовлення та відрізняється від номінальної (еталонної) поверхні. Під похибкою виготовлення, її точністю розуміють відхилення отриманого при виготовленні значення геометричного або іншого параметра від заданого (еталонного). Абсолютну похибку виражають в одиницях параметра, що розглядається. Макрогеометричні відхилення розглядаються на великих ділянках реальної поверхні деталей і характеризують точність деталі (конусоподібність, овальність та ін.):

$$\Delta X = X_{Д} - X_{Н}, \quad (2.16)$$

де  $X_{Д}$  та  $X_{Н}$  – дійсне та номінальне значення параметра відповідно.

При несиметричному розташуванні значення параметра обрано його середнє значення, а відношення абсолютної похибки до заданого значення параметра як відносна похибка  $\Delta X/X_{Н}$  або  $\Delta X/X_{Н} \times 100\%$ .

Термін «відхилення форми заданого профілю» базується на визначенні як найбільше відхилення точок реального профілю від відповідних точок номінального профілю, що визначається за нормаллю в межах нормованої

ділянки. Вимірювання відхилення нормалі до номінального профілю буде виконано вимірювальним пристроєм, яке здатне виконати такий вид вимірювання з прив'язкою до єдиної системи координат.

## **2.6 Висновки до розділу 2**

1. Визначено основні параметри якості поверхонь авіаційних деталей.
2. Розглянута методика розрахунку імовірного відсотку браку і точність форми і розташування поверхонь.
3. Встановлено, що параметри якості поверхонь авіаційних деталей обов'язково закладаються на етапі створення АЕ деталі та виробу та є вирішальними при прийнятті рішення про пропуск деталі та виробу у виробництво на етапах контролю.

### 3. СТАЛИЙ І ЗВИЧАЙНИЙ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГ

#### 3.1 Сталий реверс-інжиніринг

Звичайний реверс-інжиніринг вимагає складних пристроїв і обчислювальних засобів. З точки зору ефективності системи, процес реверсивного проектування, який менш залежить від складних пристроїв і складних обчислень, може показати вищу ефективність системи і стати більш стійким.

У цьому розділі розглядається відповідна література, що описує різні методи реверс-інжинірингу і сфери їх застосування. Звичайний схематично показано на рис. 3.1.

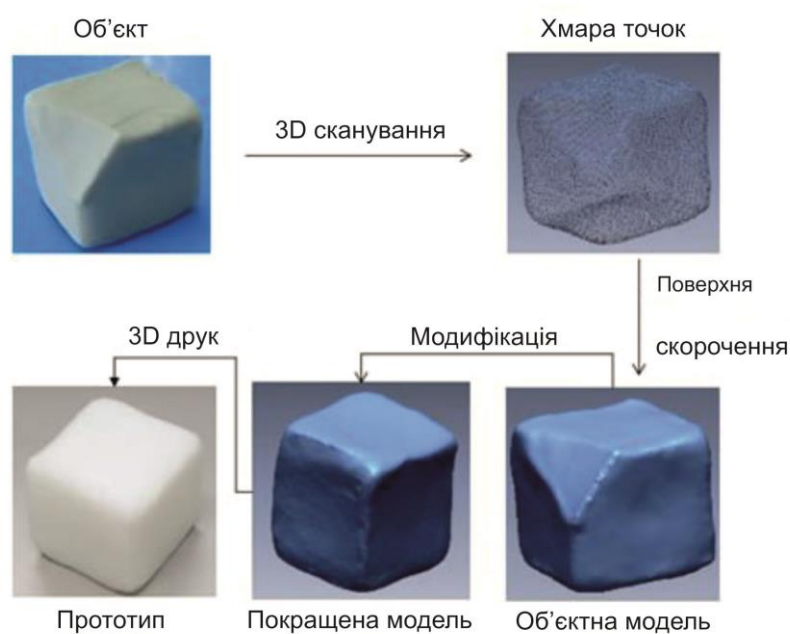


Рисунок 3.1 – Звичайний реверс-інжиніринг

Згідно з останніми дослідженнями, процес зворотного проектування залежить від процесу реконструкції твердотільної моделі (віртуальної моделі) з використанням здебільшого готових пакетів САПР. Цей процес починається з отримання даних хмари точок і закінчується побудовою віртуальної моделі. Типовими проміжними етапами є попередня обробка, сегментація, класифікація ознак і підгонка сітки/поверхні. Примітно те, що хмари точок, проскановані



лазером, демонструють шум і викиди. У результаті перед витяганням геометричних елементів потрібне попереднє і постоброблення. Багато авторів заглибилися в попередню і постобробку відсканованої хмари точок, файл якого можна використати для виготовлення деталі 3D-друком або на верстаті з ЧПК за умови виконання вимог якості виготовленої деталі. Такий реверс-інжиніринг набув назву сталого.

На сьогодні науковцями та інженерами пропонуються різні методи та алгоритми щодо оброблення отриманих хмар точок – портретів деталей – з метою уточнення їх геометрії. Аналіз показав наступне.

Морітані та ін. [11] сформулювали метод попередньої обробки відсканованої лазером хмари точок довільного простору для вилучення цифрового сліду системи трубопроводів для її ремонту (системи трубопроводів). Примітно те, що змодельована хмара точок основного елемента (циліндра) має взаємодіяти з відсканованою хмарою точок, видаляючи при цьому шум і викиди. Це досягається за рахунок використання складного алгоритму, а саме: ітеративно зваженого методу найменших квадратів. Також Массатра та ін. [12] розробили метод роботи з великою хмарою точок для вилучення ознак. Цей метод спочатку ділить масивну хмару точок на невелику хмару точок на основі ознак для побудови цифрових слідів дерев'яних ферм історичної будівлі. Нарешті, для уточнення об'єктів було додано параметричне моделювання. Інші методи комп'ютерного проектування можуть допомогти процесу уточнення.

Таким чином, можна побудувати більш ефективні системи інформаційного моделювання будівель. Щоб розробити будівельний об'єкт 'Для цифрової моделі Zeng et al. було розроблено напівавтоматичний метод. [13]. У цьому методі спочатку попередньо навчена глибока нейронна мережа глибока нейронна мережа витягує 50-вимірний вектор ознак для кожної точки. Це допомагає сегментувати хмари точок на кластери, в яких використовуються алгоритми зростання регіонів. Вибрані користувачем візуалізовані функції потім використовуються як приклади для запуску алгоритму пошуку піків для

визначення позитивних збігів. На додаток до відсканованих хмар точок, візуалізація відіграє життєво важливу роль у зворотному проектуванні.

Наприклад, Менгоні та Леопарді [14] узагальнили характеристики апаратних і програмних засобів, що використовуються як у технології активного датчика або далекомірній технології (3D-лазерний сканер), так і в технології зворотного інжинірингу на основі технології "Структура з руху" (SfM), що застосовується для цифрової документації археологічних розкопок. Перший безпосередньо отримує оординати відкритих поверхонь об'єкта. Ці координати перетворюються в тривимірну твердотільну модель після виконання необхідної попередньої та подальшої обробки, як згадувалося раніше. З іншого боку, останній (SfM) об'єднує серію фотографій об'єкта і створює його тривимірну твердотільну модель. SfM хороший у побудові факсиміле об'єкта. Коли об'єкт масштабується, хмари точок високої роздільної здатності, отримані за допомогою 3D-сканера, мають бути інтегровані з технікою SfM, щоб забезпечити точність об'єкта.

В доповнення до SfM для реверс-інжинірингу можна використовувати й інші методи візуалізації. Наприклад, множинне обертальне зображення можна використовувати для реконструкції цифрової моделі об'єкта на основі вокселів, як показано Nanya et al. [15]. Вокселі генеруються із зображень. Цей метод вимагає ручної перевірки деяких країв, щоб переконатися, що цільове ребро знаходиться всередині або за межами потрібної області зображення. Це призводить до усунення надлишкових вокселів. Реконструкція силуетів увігнутих областей і дуже тонких сегментів - дві основні проблеми методу. Щоб подолати ці проблеми, апаратне/програмне забезпечення, що використовується для збору даних (візуалізації), потребує поліпшення.

Що стосується контролю якості, зворотний інжиніринг виявився дуже корисним. Захос та ін. [16] показали, як використовувати хмару точок виготовленої лопатки турбіни для визначення її точності в порівнянні з її конструкцією. Сегрето та ін. [17] розробили метод зворотного проектування на основі хмари точок, корисний для контролю якості аерокосмічних компонентів,

виготовлених із полімерних композитів, армованих вуглецевим волокном.

Дослідження показало, що для порівняння цифрових 3D-моделей виготовленої деталі та її конструкції потрібні спеціальні користувацькі інтерфейси. Урата та ін. [18] розробили метод зворотного проектування для виробництва готових литих виробів із високою поверхнею. У цьому методі спочатку сканується наявна відлита деталь, щоб підготувати дані сітки її поверхні. Дані обробляються з використанням спеціальної техніки геометричного моделювання для розділення литої та обробленої поверхонь. Після цього межа модифікується для створення цифрової моделі вилівки. Коли об'єкт недоступний, ескізи можна використовувати для зворотного проектування, оскільки ескізи є природним та інтуїтивно зрозумілим засобом вираження концепцій [20]. У цьому випадку ескіз необхідно перетворити в готову твердотільну модель, сумісну з САПР.

Різні типи алгоритмів машинного навчання використовуються для зворотного проектування об'єкта за його ескізом [20]. У цих алгоритмах використовують топологічні бази правил деяких обраних пар вершин. Ці правила мають встановлювати топологічні відносини між ребрами і вершинами на грубих перетинах ескізу. Таким чином, правила допомагають інтерпретувати грубий начерк з точки зору правильних геометричних об'єктів. Наприклад, Танака та ін. [21] розробили статеві набори правил для розроблення системи. Система перетворює грубий ескіз (що складається з вигнутих і прямих країв) у твердотільну модель, сумісну з пакетом САПР.

На додаток до відсканованих хмар точок, зображень і ескізів існує ще один тип зворотного проектування, за якого аналітичні точки використовують для імітації важливих якому аналітичні точки використовуються для імітації важливих характеристик об'єкта. Аналітичні хмари точок можна створювати різними способами. Наприклад, Montlhus et al. [22] представив аналітичний метод зворотного проектування на основі хмари точок. Метод аналітично створює відскановані хмари точок моделей промислового складання. Спочатку створюється водонепроникна трикутна сітка, що охоплює відповідну модель

САПР. Нарешті, метод перетворює сітку в хмару точок. Оскільки метод не використовує лазерний сканер для отримання хмари точок, він вільний від обчислювальних складнощів (видалення надлишкових і зашумлених точок, побудова поверхні з хмари точок тощо).

Таші та ін. [23-25] розробили аналітичний реверс-інжиніринг на основі хмари точок. У цьому випадку для створення хмари точок планування використовується рекурсивний процес. Процес заснований на роботі, виконаній Ullah et al. [26]. Він ефективний при зворотному проектуванні 2,5- і 3D-форм. Цей метод допомагає розробити новий різновид зворотної інженерії, який визначається як когнітивна зворотна інженерія людини [27].

### 3.2 Методологія сталого реверс-інжинірингу

Схематично сталий реверс-інжиніринг показано на рис. 3.2.

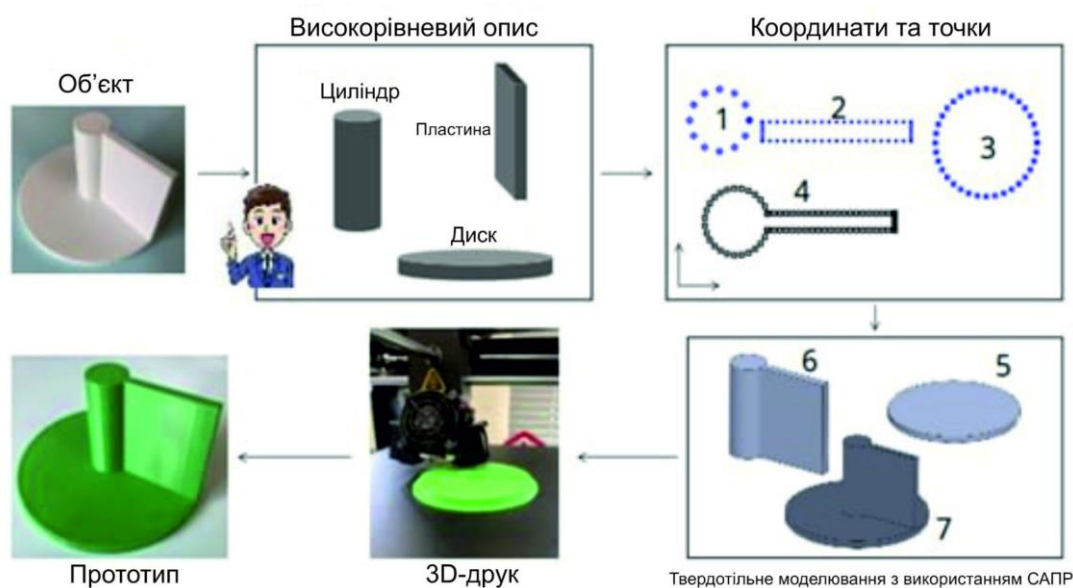


Рисунок 3.2 – Пропонований сталий метод реверс-інжинірингу

На першому етапі створюється високорівневий опис об'єкта, що підлягає реверс-інжинірингу. Результат цього кроку залежить від людини, яка описує об'єкт, використовуючи деякі лінгвістичні вирази. Наприклад, згідно зі сприйняттям людини, знайомої з основними геометричними формами, об'єкт, показаний на рис. 3.2, складається з трьох елементарних фігур, названих циліндром, пластиною і диском.

Другий і третій етапи створюють елементарну і скоординовану хмари точок, відповідно, що представляють функції планувальника фігур. Для створення елементарних хмар точок можна використовувати алгоритм, показаний у [23-26]. Наприклад, три елементарні хмари точок, показані на рис. 3, створюються з використанням алгоритму, показаного в [23-26]. Хмари точок, позначені як 1, 2 і 3, представляють площі поперечного перерізу елементарних форм, званих циліндром, пластиною і диском відповідно.

На четвертому етапі створюється твердотільна модель елементарних і скоординованих хмар точок із використанням готового пакета САПР. Наприклад, як показано на рис. 3, хмари точок 3 і 4 перетворюються на дві моделі гладких тіл, позначені як 5 і 6 відповідно, з використанням наявного в продажу пакета САПР. (Назва не розголошується, щоб уникнути комерційного використання.) Варто зазначити, що більшість комерційно доступних пакетів САПР нині пропонують функцію прямого імпорту координат точок, що становлять хмару точок. Імпортовані хмари точок можуть бути перетворені в (найімовірніші) замкнуті криві/лінії перед виконанням твердотільного моделювання з використанням деяких зумовлених функцій, наприклад, обертання, видавлювання, лофта, протягування, оболонки тощо.

Останній крок – 3D-друк або фрезерування на верстаті з ЧПК. На цьому етапі відповідний процес адитивного виробництва може створити прототип з використанням віртуальна модель за її інформацією.

### **3.3 Порівняння сталого та звичайного реверс-інжинірингу**

Схематично сталий реверс-інжиніринг на нескладній деталі показано на рис. 3.3.

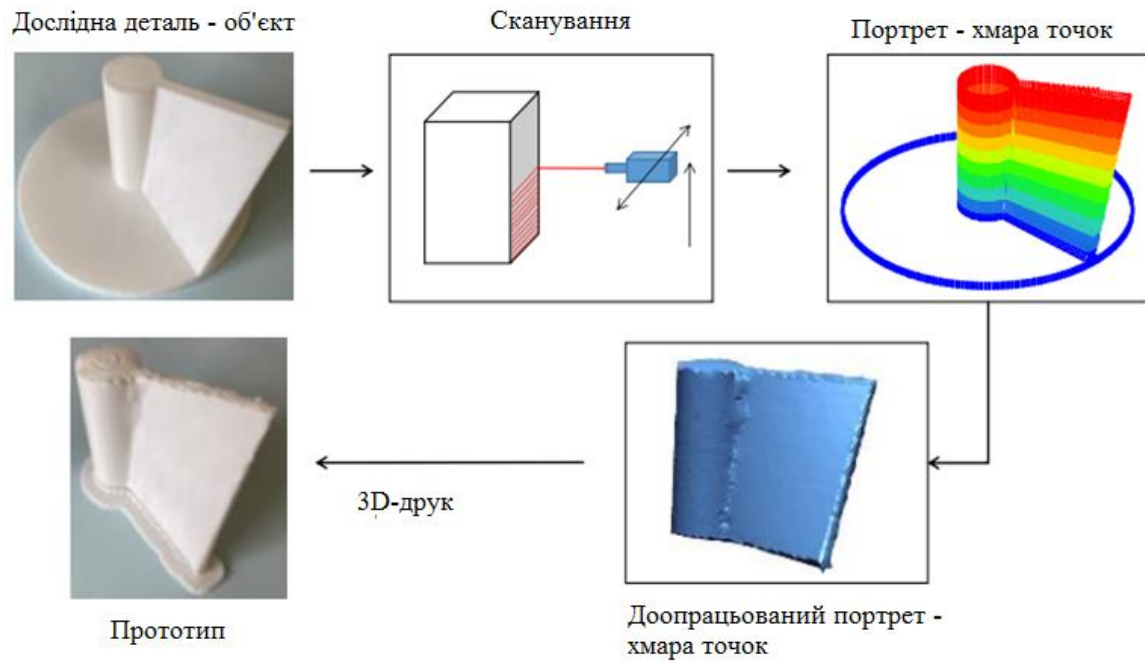


Рисунок 3.3 – Схема сталого реверс-інжинірингу дослідної деталі

На рисунку 3.4 наведено звичайний реверс-інжиніринг більш складної деталі, де утворюється АЕ (віртуальні 3D-моделі тощо).

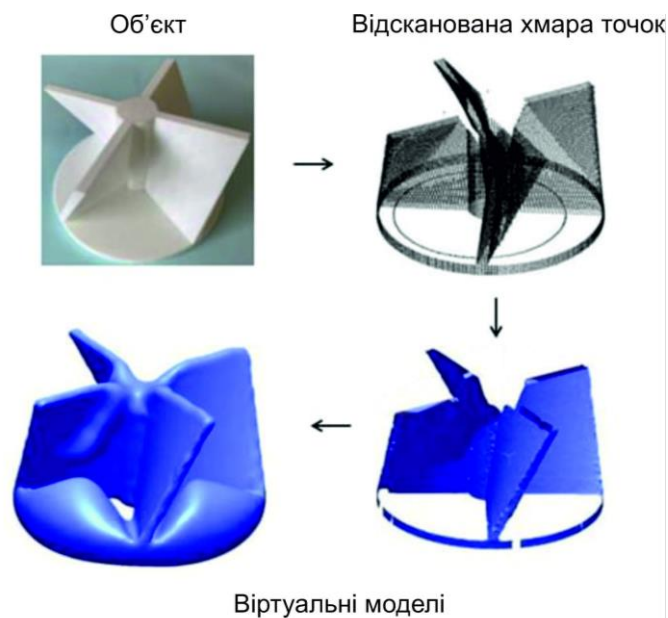


Рисунок 3.4 – Схема звичайного реверс-інжинірингу

При опрацюванні отриманих хмар точок дослідної деталі, об'єкт розкладається на форми: циліндри, пластини і диски (рис. 3.5). Зокрема, хмари

точок 1, 2 і 3, що представляють дугу кола, прямокутну межу і коло відповідно, становлять елементарні хмари точок. Координовані хмари точок 5, 6 і 7 створюються шляхом обертання іншої координованої хмари точок, хмари точок 4, що зберігає симетрію об'єкта. Скоординована створюється хмара точок шляхом додавання елементарних хмар точок 1 і 2 і віднімання однієї з ліній у хмарі точок 2. Можна додати скоординовані хмари точок 4, 5, 6 і 7, зберігаючи безперервність для створення іншої скоординованої хмари точок, позначеної як 8, як показано на рис. 3.5.

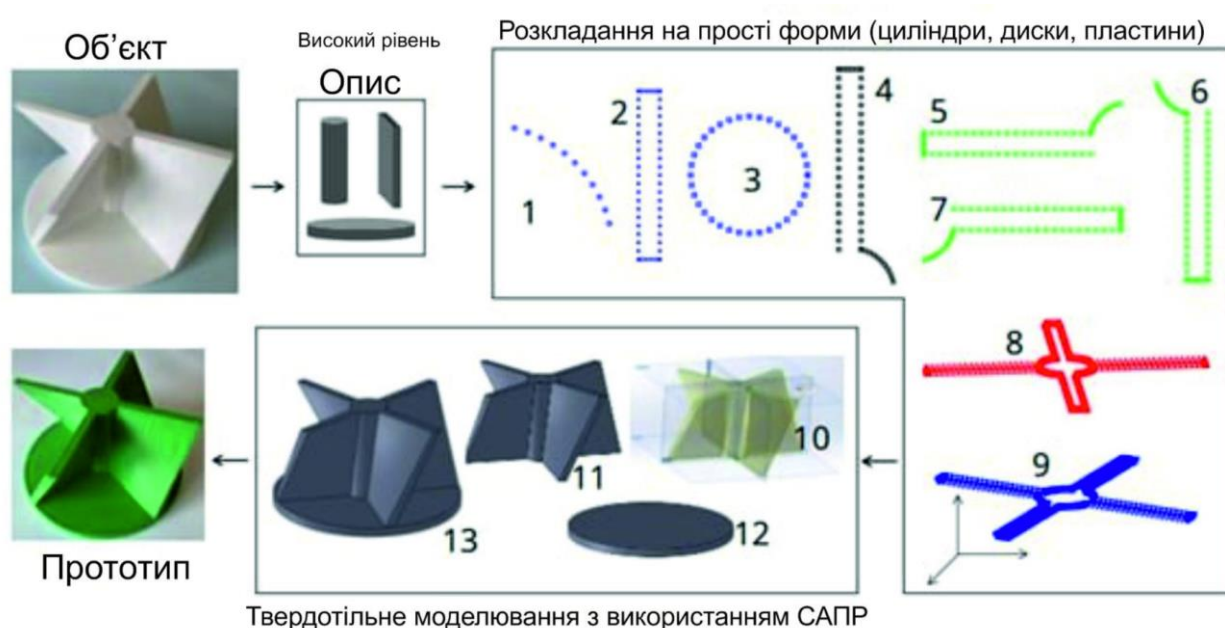


Рисунок 3.5 – Опрацювання хмар точок в сталому реверс-інжинірингу

Хмари точок 8 і 9 можна імпортувати у готовий пакет САПР для виконання геометричного моделювання. Процес перетворення хмари точок у твердотільну модель (модель 11) показаний об'єктом 10, де дві плоскі межі (хмари точок 8 і 9), розділені необхідною висотою, видавлюються для створення твердотільної моделі (модель 11). Таким чином, твердотільне моделювання цього разу створює моделі 11 і 12. Ці дві моделі можна додати для створення віртуальної моделі (позначеної як 13). Віртуальну модель можна роздрукувати за допомогою доступного 3D-принтера для виготовлення прототипу, як показано на рис. 3.5.

Таким чином, представлений реверс-інжиніринг дає кращі

результати, ніж традиційний реверс-інжиніринг на основі сканованої хмари точок при забезпеченні відповідних вимог точності виготовлення АД. Однак при жорстких вимогах точності сталого реверс-інжинірингу недостатньо і він може бути використаний лише для уточнення геометрії отриманого портрету для АЕ. Однак інтеграція представленого процесу зворотного проектування з проектуванням ЖЦВ може сприяти сталому розвитку продукту.

### **3.3 Висновки до розділу 3**

1. Виконано аналіз існуючих алгоритмів і підходів щодо створення АЕ/ЕМ та оброблення портретів – хмар точок на базі звичайного та сталого реверс-інжинірингу.

2. Наведено методологію сталого реверс-інжинірингу та виконано порівняння зі звичайним.

3. Показано, що реверс-інжиніринг імітує критичні характеристики наявної дослідної АД для створення його точних або поліпшених віртуальних/фізичних моделей. Таким чином, це корисно при створенні цифрових портретів та АЕ.



## **4 ПРОТОТИПУВАННЯ ЗА МЕТОДАМИ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

### **4.1 Адитивне виробництво в системі швидкого виробництва АД**

Сучасному інженеру добре відомо, якими трудомісткими є процеси створення предмету інженерної розробки, починаючи від обґрунтування ідеї, створення прототипу й виробництва першого промислового зразка та, з рештою, комерційного оригіналу продукції. В цьому ланцюжку, якраз етапи створення прототипів продукції, проведення їх ґрунтового аналізу, перевірки функціоналу й ергономіки, займають значний час всієї розробки.

Донедавна роботи зі створення та виготовлення прототипів виконувались вручну кваліфікованими інженерами. Крім збільшення часу на виготовлення продукту, ручна робота часто обмежувала кількість можливих конструктивних змін. Це не дозволяло досягнути достатньої оптимізації продукту, його конструктивної досконалості і, особливо, функціональності. Тут, слід зазначити, що ця стратегія відтворення конструктивних елементів для деталей простої геометрії, активно використовується і зараз, коли за допомогою примітивів у спеціалізованому програмному середовищі будується параметрична 3D модель.

Проте, в умовах значного зростання вимог до продуктивності та мобільності виробництва ручне прототипування переросло у серйозну проблему, рішення якої було знайдено за рахунок розробки та впровадження автоматизованих комп'ютерних технологій швидкого прототипування (RP – Rapid Prototyping). На етапах підготовки продукту до комерційного виробництва стали широко використовувати 3D системи та полігональні 3D моделі для створення фізичних предметів, прототипів, інструментального оснащення та функціональних деталей. Можливості цього напрямку, звісно, були сильно посилені швидким та глобальним прогресом в галузі цифрових та інформаційних технологій, процесорних систем, комп'ютерної інженерії, апаратних засобів комп'ютерних систем, також в галузі матеріалознавства, структурування сучасних матеріалів, та цифрового світу виробництва, загалом.

Функціональність матеріальних об'єктів залежить від двох їх характеристик: форми й складу матеріалу. Наприклад, хороший естетичний вигляд скульптури залежить від її форми, в той час, як, її міцність залежить від фізичних властивостей матеріалу. Відповідно, ідеальним виробничим процесом є такий, за допомогою якого можна згенерувати будь-яку геометричну форму з будь-якого матеріалу. Однак традиційні виробничі процеси (консервативні чи субтрактивні) вкрай обмежені в цьому відношенні.

Адитивний підхід передбачає створення об'єкта на «порожньому місці» шляхом поступового додавання матеріалу. Матеріал, який додається кожен раз, може бути однаковим або різним. Таким чином, тут забезпечується можливість одночасного вирішення завдань формоутворення і контролю складу матеріалу в рамках одного процесу. Чим менше об'єм матеріалу, який додається на кожному етапі, тим більше досяжна точність форми та ступінь контролю складу матеріалу.

Перевагою цього підходу, є те, що теоретично з його допомогою може бути отримана будь-яка тривимірна форма без використання зовнішніх інструментальних засобів із заданою формою. Це дозволяє повністю уникнути проблем, пов'язаних з консервативними і субтрактивними методами.

Методи пошарового синтезу на початку використовувались для створення демонстраційних моделей виробів в процесі їх розробки. Загальновідомо, що ці моделі можуть бути набагато корисніші, ніж креслення або зображення для повного розуміння функцій виробу при концептуальному проектуванні. Незважаючи на наявність швидких і просто створюваних креслень, в кінцевому підсумку, більш бажаним є використання фізичних моделей, щоб досконало перевірити працездатність виробу.

Переслідуючи цю початкову мету простого створення моделей, адитивне виробництво (далі – АМ – Additive Manufacturing) прогресувало в напрямку поліпшення матеріалів, точності та загальної якості вихідного продукту [2]. Отримувані моделі швидко стали використовуватися для забезпечення інформації про те, що зараз називається «3F» (Form – форма; Fit – збирання;

Function – функція). Відповідно, якщо зараз сказати, що технологія адитивного виробництва корисна лише для створення моделей, то це буде неточною і заниженою оцінкою.

Сучасне адитивне виробництво в його поєднанні з іншими технологіями для формування технологічних ланцюжків може бути використано для значного скорочення термінів розробки та вартості продукції. В таких умовах постає проблема та ряд комплексних задач, пов'язаних з вирішенням питань швидкої адаптації методів реконструкції об'єктів до значної мінливості процесів АМ в розрізі їх комерційних переваг. Інженеру слід швидко отримувати цифрові дані про об'єкт, що були б придатні для успішної реалізації відтворення об'єкту адитивними методами, та й ще ж до того – з можливістю простої та швидкої їх корекції. Звісно, мова тут іде про швидке отримання якісної параметричної моделі на основі цифрових сканів чи полігональних моделей, що навіть зараз, з появою спеціалізованих програмних продуктів, є не настільки простим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав наступне. Використовуючи різноманітне програмне забезпечення та технологічні платформи, розширені обчислювальні потужності та можливості комунікацій, масштаби гнучкості сучасного адитивного виробництва різко зросли [1-3]. Крім того, значно зросла точність та надійність виробів, а висока ефективність проектування дає можливість впровадити індивідуальні технології виробництва продуктів із майже нескінченною гнучкістю дизайну. Всі існуючі зразки комерційного обладнання для адитивного виробництва в даний час використовують пошаровий підхід, і головна їхня відмінність полягає в матеріалах, які вони можуть використовувати, в техніці створення шарів і способах зв'язування шарів між собою. Дані відмінності визначають такі чинники, як точність побудованої деталі, а також склад її матеріалу і механічні властивості. Крім того, вони визначають, як швидко може бути виготовлена деталь, розміри використовуваного АМ обладнання та загальну вартість обладнання і процесу [4].

У випадку FDM друку, як найбільш доступної зараз технології пошарового просторового синтезу, номенклатура використовуваних полімерних матеріалів є найбільш широкою серед інших способів адитивного виробництва [5]. Це розширює можливості щодо оптимізації експлуатаційних характеристик виробів. З іншого боку, актуальними залишаються питання стратегії побудови CAD моделей [6], оптимізації її геометрії, підготовки та адаптації цифрових даних, вибору напрямку пошарового синтезу, оптимізації алгоритму побудови, для кожного конкретного виробу та задачі реінжинірингу, загалом [7].

За останні роки розроблено досить досконалий математичний апарат для обробки великих цифрових масивів CAD даних, на основі якого з'явилися багато комерційних програмних продуктів реверс-інжинірингу [8]. Проте, для конкретних завдань прототипування важливим є вибір чи власна побудова стратегії процесу, що вимагає аналізу та співставлення переваг та недоліків відомих методів реконструкції моделей.

#### **4.2. Зв'язок адитивного виробництва та реверс-інжинірингу**

Адитивне виробництво включає в себе кілька етапів (рис. 4.1), починаючи з віртуального CAD опису деталі та її функціоналу, отримання цифрових даних процесу, та закінчуючи фізичним результатом її створення. Різноманітні вироби включають в себе процеси адитивного виробництва різними шляхами та в різній мірі. Відносно прості вироби можуть використовувати адитивне виробництво для демонстраційних моделей, в той час як, більші та складні вироби з великим інженерним наповненням можуть використовувати адитивне виробництво на багатьох етапах процесу розробки.

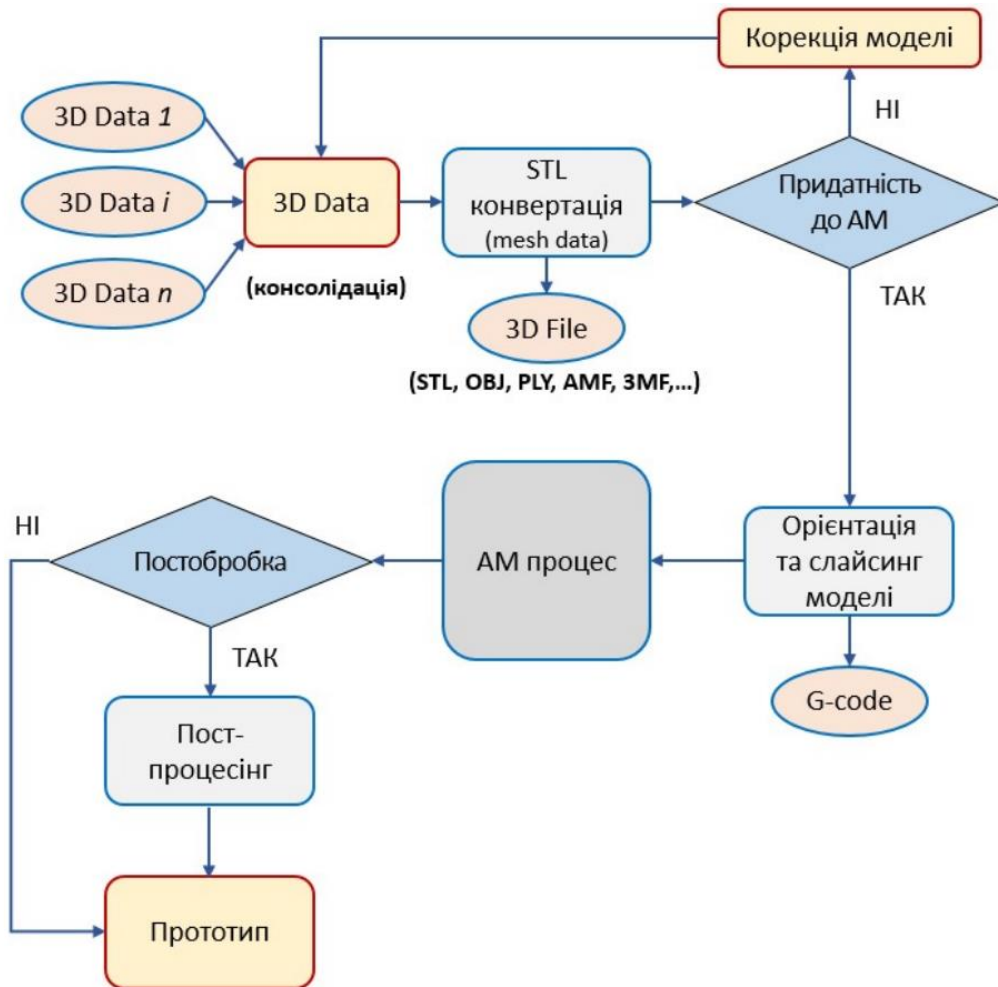


Рисунок 4.1 – Схема адитивного виробництва при утворенні STL-файлу для друку

За багатьох процесів адитивного виробництва, виріб являє собою чорновий зразок, з чорновими розмірами та грубими поверхнями, швидке створення яких може бути забезпечено адитивним виробництвом. На кінцевих етапах процесу виготовлення, деталі можуть зажадати ретельного очищення і подальшої обробки, шліфування, підготовку поверхні та забарвлення перед своїм використанням. Тут, також, адитивне виробництво може бути більш вигідним, в силу своєї можливості створення складних геометричних форм без інструментальної обробки.

Результат реверс-інжинірингу залежить від детального аналізу кожного його етапу та вибору стратегії САД підготовки, процесу друку та постобробки. Тут, сам процес пошарової побудови чи 3D друку, після отримання 3D

машиною цифрових даних побудови, мало залежить від користувача, що вигідно вирізняє адитивне виробництво від інших виробничих процесів.

Важливими є етапи, так званого препроцесінгу, якраз прийняті тут рішення і визначають загальну стратегію прототипування. Для авіаційних виробів актуальним буде інженерний аналіз, який визначить методи збору цифрових даних та CAD моделювання, варіанти цифрових форматів, просторову орієнтацію моделі та напрям пошарового синтезу, можливі матеріали, а відповідно і загальною технологією адитивного виробництва. В машинобудівних задачах на етапі збору інформації про об'єкт актуальним є аналіз можливих способів, якими був виготовлений цей об'єкт. Тут, стратегії реверс-інжинірингу пов'язують з методами, що полягають у комплексному аналізі виробу, складу матеріалів, технологій, з формуванням не просто CAD даних, а і опису виробничих процесів – CAE/CAM даних.

*Тобто зворотній інжиніринг для індустріальних процесів це непросте копіювання створеного раніше виробу, а отримання знань про те, яким чином цей виріб був виготовлений. Така стратегія дозволить покращити виріб та знайти нові рішення щодо його виробництва.*

Важливим етапом RE-процесів є оцифрування фізичного об'єкту (отримання та моделювання форми) та його віртуальне представлення. Для цього можливе застосування контактних датчиків, що широко використовуються для вимірювання механічних деталей у промисловості. Проте, для авіаційних деталей складної форми, більше підходять безконтактні датчики та 3D сканери. Оцифрування дозволяє контролювати АД, порівнювати результат оцифрування з еталонною CAD моделлю, тобто з його АЕ та вимірювати точні геометричні характеристики. Але оцифрування за допомогою безконтактного датчика залишається складним процесом.

Сьогодні на ринку 3D технологій отримали широке застосування активні системи 3D сканування зі структурованим світлом [2]. 3D сканери зі структурованим світлом працюють за методом захоплення всього поля опромінення, що зменшує час сканування в порівнянні з лазерними системами.

Структурований світловий потік (малюнок) спрямовується на об'єкт за допомогою LCD проектора або іншого стабільного джерела світла (рис. 4.2) та аналізується деформація малюнку на об'єкті. Камера, зміщена від джерела світла, спрямована на форму візерунка під кутом ( $\beta$ ) та обчислює відстань до кожної точки в полі зору.

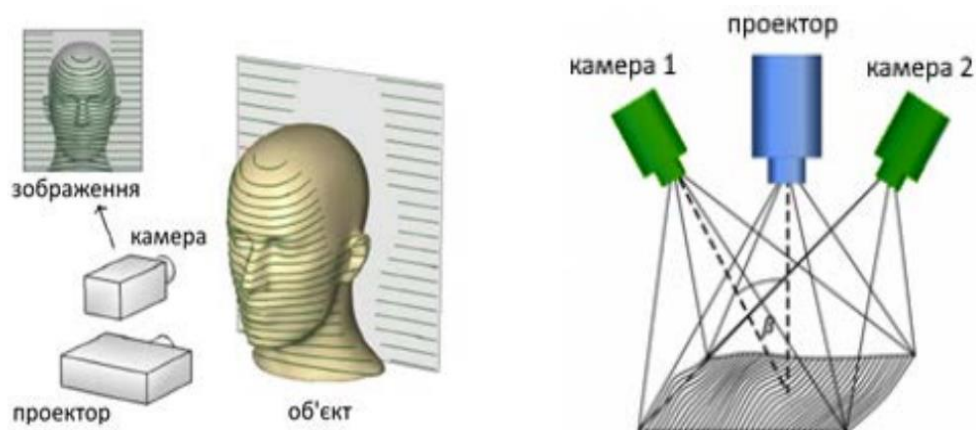


Рисунок 4.2 – Принцип роботи оптичного 3D сканера зі структурованим світлом

Зворотна інженерія з використанням оптичних структурованих 3D сканерів дозволяє досягати високої роздільної здатності, що важливо за потреб захоплення дрібних елементів деталей. Проте, точність сканування (рис. 4.3) може поступатися лазерним сканерам. Для мінімізації останнього виконують сканування з багатьох ракурсів, з наступною консолідацією отриманих хмар точок та корекцією точкових даних.

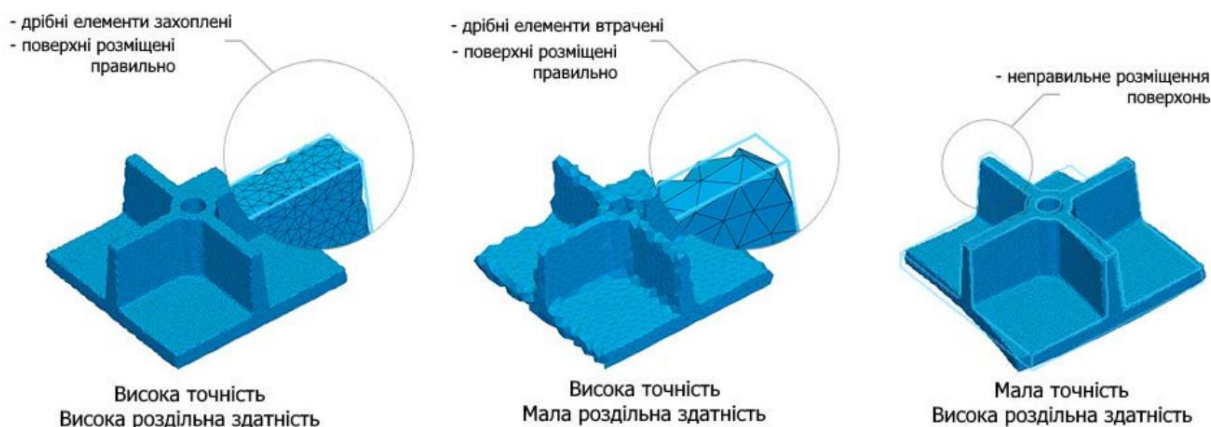


Рисунок 4.3 – Точність та якість полігональних моделей

В деяких задачах точність сканування оптичними сканерами може не задовольняти інженера. Таким чином, за вибору стратегії реінжинірингу, що передбачає повну автоматизацію отримання цифрової моделі, слід уважно обирати методи 3Д сканування. Часто така стратегія є виправданою в аматорстві, де основною задачею є отримання звичайної копії виробу, безточного відтворення всіх конструктивних елементів оригіналу.

#### 4.3 Реверс-інжиніринг дослідної деталі та аналіз за його двома методами

Для прикладу, у роботі наведено отримання цифрової моделі важеля подачі акумуляторного клейового пістолета Bosch GluePen (рис. 4.4). Аналіз геометрії, матеріалу та основних конструктивних поверхонь, показав, що важіль виготовлений методом екструзії пластику у формах для лиття під тиском. Функціонально важіль приводить в рух механізм подачі клейового стрижня у блок нагріву та під час роботи зазнає згинального навантаження. Як помилку виробника, слід відмітити відсутність блокування руху важеля за умов повного розрідження клею у нагрівальній камері, тобто не досягнення робочої температури блоку нагріву. Неуважність користувача та прикладання надмірних зусиль викликали руйнування важеля в зоні дії найбільшого згинального моменту, це місцеве заглиблення для входу колінного шарніру механізму подачі, що розташоване в середній його частині.



Рисунок 4.4 – Важіль подачі клейового пістолету (місце руйнування)

Використовували дві стратегії реверс-інжинірингу: сталого – оцифрування хмар точкових даних, отриманих за допомогою оптичного



сканера моделі EinScan-SE фірми Shining 3D; звичайного – ручна реконструкція АЕ з використанням твердотільного моделювання у САД редакторі.

Принциповий аналіз об'єкту та його функціоналу, а також можливості EinScan-SE, як активної системи сканування зі структурованим світлом дає надію на адекватність результату реалізації першої стратегії. Слабкою стороною цього варіанту реверс-інжинірингу є колірна температура об'єкту: важіль виготовлений з темного, чорного пластику, що послаблює температурну насиченість променів структурованого світла сканеру та може ускладнити збір хмар точок під час сканування. Як відомо деталі чорного кольору мають проблеми сканів у випадку використання оптичних активних 3D сканерів [6]. Окремою проблемою може стати також недостатня матовість зовнішніх та глянець внутрішніх поверхонь деталі. Глянцеві темні поверхні взагалі нездатні формувати хмари точок в оптичних системах сканування.

Ці особливості здатні вкрай ускладнити швидке та якісне формування лише портрету – хмари точок, а в подальшому і цифрової моделі, що може викликати навіть зміну стратегії реверс інжинірингу. Зокрема, в процесі синтезу 3D моделі нами була використана стратегія прямого САД моделювання з використанням примітивів у просторових редакторах. Як відомо, такий процес реінжинірингу є вкрай трудомістким та зайняв багато часу на побудову моделі. Цю стратегію можна виправдати за умов виробництва великої кількості деталей одного прототипу з визначеною геометрією. Також на перевагу стратегії, може бути використана потреба у наступній корекції геометрії моделі, зміни її конструкції та дизайну, на випадок еволюції самого виробу чи механізму, в якому вона застосовується. У першому варіанті прототипування важеля здійснювали в автоматичному режимі сканування об'єкту системи Shining EinScan-S, з поворотом столу на 360° та без врахування текстур. За результатами сканування (рис. 4.5) встановлено, що навіть за умов повільного сканування з кроком 3 повороту стола у 10°, для оригіналу деталі без підготовки поверхонь, важко отримати потрібну кількість точок, за якими програма могла б здійснити відтворення хоча б примітивної геометрії важеля.

На таку ситуацію мало впливає навіть режим HDR сканеру, що працює у високому динамічному діапазоні світлового поля: отримана хмара точок скану мала густину, недостатню для відтворення потрібної геометрії.

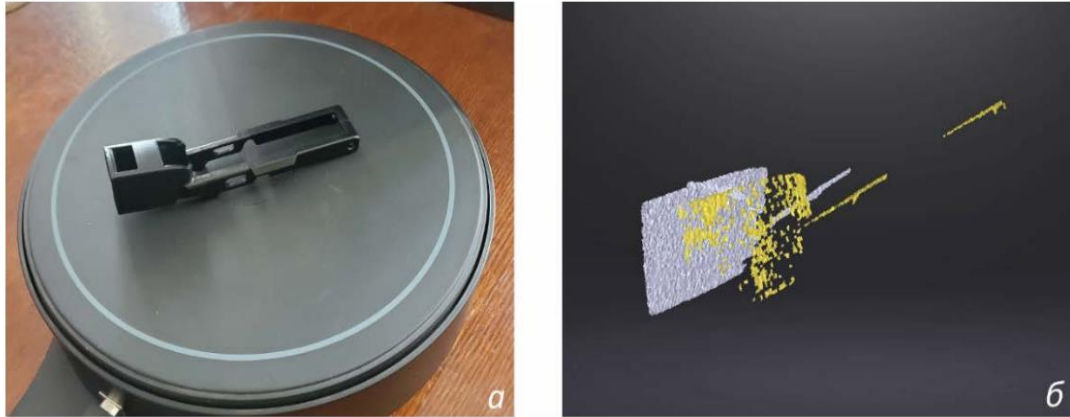


Рисунок 4.5 – Результат сканування деталі без обробки поверхні

Кардинально виправити ситуацію можна використанням аерозолі чи спреїв для матування поверхонь. Нанесений шар ефективно матує поверхню, що сприяє поглинанню падаючих світлових променів та дозволяє камерам сканеру з легкістю фіксувати всі тонкощі геометрії деталі. Спеціалізовані спреї є досить ефективними, але й дорогими. У нашому випадку було використано спосіб покриття поверхонь деталей звичайною акриловою суспензією білого кольору без глянцевого ефекту. Суспензію наносили пензликом (рис. 4.6), розрівнюючи на плоских ділянках.

Основним результатом тут є матовість поверхонь та їх високий температурний колір, що сприятливо впливає на результат оптичного сканування з використанням структурованого світла.



Рисунок 4.6 – Результат сканування деталі після матування поверхні

Накладання 3D сканів у програмі EinScan-S реалізовано за послідовною схемою. Отримані групи хмар точкових даних для двох сканів з різних ракурсів об'єднувались в автоматичному режимі на основі характеристик. Лише після виконання консолідації попередніх двох сканів є можливість додавання наступного третього скану, отриманого під іншим ракурсом розміщення деталі на поворотному столику. Об'єднанням декількох 3D сканів можна досягати більшої точності сканування.

На цьому етапі реконструкції встановлено, що за умов матування поверхні пластику для отримання якісної полігональної моделі достатньо двох сканів, з використання максимальної кількості поворотів стола (36, з кроком 10°). Враховуючи, що на отримання одного скану витрачається чимало часу, який залежить від обчислювальної потужності комп'ютера, вибір кількості сканів та повороту столика сканеру напряду впливають на продуктивність та вартість процесу RE. Зрозуміло, що ця обставина має бути врахована у загальній стратегії реінжинірингу, та вона є залежною від складності геометрії деталі й стану її поверхні.

Після фази збору необхідний етап попередньої обробки, щоб підготувати отримані 3D дані для наступних операцій. Цей крок є частиною кожного процесу RE, часто є простою програмною реалізацією та іноді виконується безпосередньо програмним забезпеченням 3D сканера. На цьому етапі виконується зменшення кількості отриманих точок, реєстрація хмар точок і процес згладжування. Це лише деякі з типових процесів, які виконуються для того, щоб зменшити помилки й складність цифрових даних, та, з рештою, отримати придатну основу для сегментації, тобто формування полігональної моделі, або ж STL файлу.

Отримана таким чином полігональна модель може містити надмірно велику множину *mesh* даних. Це збільшує розмір файлу STL моделі та значно ускладнює подальшу роботу, аж до блокування програмного забезпечення для слайсингу, не говорячи вже про цифрову обробку моделі та її параметризацію, за потреби. Як відомо, більшість програм слайсерів для FDM друку задовільно

справляються з файлами твердотільних моделей, розмір яких не перевищує 25 Мб. виправити положення можна безпосередньо у програмі сканування EinScan-S, вибравши функцію спрощення у процесі постобробки моделі. Так можна забрати артефакти на плоских поверхнях моделі, що виникають як наслідок фіксації текстур акрилової фарби, залишені пензликом (рис. 7).

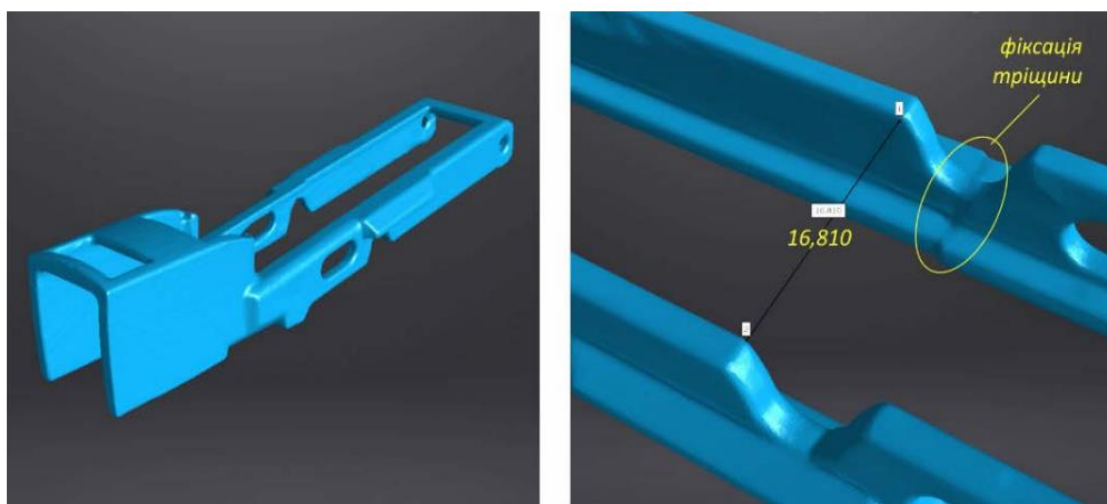


Рисунок 4.7 – Полігональна STL модель важеля

Фазу корекції моделі продовжили у зовнішньому редакторі *mesh* даних MeshLab. Робота полягала у видаленні артефактів, згладжуванні, що відповідно дало зменшення розміру файлу моделі. Проте, головним завданням було корекція та реконструкція цілісності моделі за ознаками функціональності деталі у виробі. Як видно з рисунку 7 (праворуч), у *mesh* даних зафіксовано зміщення у тілі моделі, причиною якого є тріщина на оригіналі. З аналізу інженерних даних, зрозуміло, що такий дефект можна усунути банальним копіюванням цілісної частини моделі, адже важіль є симетричним за конструктивними ознаками. Подібну корекцію часто застосовують у стратегіях реверс-інжинірингу деталей з втраченими чи пошкодженими симетричними елементами. Подібна постобробка дозволяє отримати придатну до FDM друку 3D модель деталі та не займає багато часу. Але функціональність моделі з огляду на глобальну корекцію геометрії та конструктивної еволюції виробу, за потреби, є обмеженою, адже модель являє собою полігональне тіло, а не CAD модель з параметричним набором даних. Для отримання повноцінної CAD

модель важеля, як вже відмічалось, в роботі паралельно використовували іншу стратегію побудови в інженерній системі Solidworks, на основі прямих обмірів та послідовним параметричним моделюванням, з використанням примітивів. Такий процес є досить кропітким та тривалим, відповідно, цю стратегію можна запропонувати для геометрично простих інженерних виробів, чи у випадку потреби внесення постійних змін у геометрію конструктивних елементів. Наявність базової параметричної моделі тут значно полегшує роботу, адже ми маємо дерево побудови з конкретними геометричними примітивами, поверхні яких визначені математично, наприклад на основі *B-Spline* або *NURBS* кривих.

Слід зазначити, що у практиці реверс-інжинірингу, останнім часом, застосовують ще одну стратегію реконструкції, яка поєднує елементи попередніх стратегій. Для її реалізації необхідне спеціалізоване програмне забезпечення (Geomagic Design X, Polyworks, Autodesk Powershape) та значні потужності апаратних систем обчислень. Хоча в роботі цю стратегію не використовували, але суть її полягає в отриманні полігональних цифрових моделей, з використанням методів 3D сканування, та наступного перетворення моделі у параметричну, за допомогою програмних 5 алгоритмів комплементативі сегментованих поверхонь та математичних сплайнів. Постійне вдосконалення алгоритмів та збільшення обчислювальних потужностей комп'ютерів дозволяє з успіхом застосовувати таку стратегію реверс-інжинірингу для індустріальних задач з високим ступенем комерціалізації кінцевого продукту. З метою зменшення інвестиційного навантаження у задачах інженерної реконструкції зустрічається також застосування програмних модулів та додатків (Solidworks ScanTo3D, Siemens NX, Autodesk Fusion 360), в яких процес детермінації просторових 3D даних є напіваавтоматичним.

Отже підводячи підсумки, зазначимо, що на якість отриманих скануванням хмар точок та опрацювання портрету при сталому реверс-інжинірингу потрібно виконати попередній аналіз геометрії та властивостей матеріалу дослідної АД. Вагомим і вирішальним є визначення геометричної точності на виготовлену деталь. Звичайний реверс-інжиніринг більш

трудомісткий, але дозволяє «редагувати» АЕ та уточнювати не тільки геометрію, а й інші властивості матеріалу, задані параметри якості (шорсткість, плоскісність, овальність тощо). Вартість процесу та виготовлення дослідної деталі залежить від фінансових можливостей виробника та кількості/партії деталей.

Аналіз прототипування важіля показав, що представлений підхід можна буде використати на будь-яких авіаційних деталях.

#### **4.4 Висновки до розділу 4**

1. Показано, що на вибір методів реверс-інжинірингу впливають багато факторів. Це і сам зміст задачі відтворення об'єкту (велике комерційне замовлення, власний проект, чи одиничний ремонт), це і функціональність та геометрія виробів, їх ступінь інженерії, а також, як і матеріал прототипу, так і матеріал відтворення об'єкту у процесі самого 3D друку.

2. Виконано аналіз сталого та звичайного реверс-інжинірингу на важелі клейового пістолету, що стане корисним для будь-яких авіаційних деталей. Показано, що повна та вичерпна ідентифікація стратегій реверс-інжинірингу в машинобудуванні є справді складним завданням через низку специфічних ознак (геометрична точність, кількість/партія необхідних виготовити деталей, матеріал тощо).

## ВИСНОВКИ

1. Показано інформаційне забезпечення виробництва авіаційних деталей та виробів на протязі всього ЖЦВ. Головним джерелом стає АЕ деталі та виробу, в якому є повна інформація для виробництва, контролю та експлуатації.

2. Виконано аналіз впровадження реверс-інжинірингу в існуючі налагоджені системи виробництва при підтримці ЖЦВ та надано аналіз поступового переходу від плазово-шаблонних технологій в цифрові за допомогою реверс-інжинірингу.

3. Розкрито поняття аналітичного еталону деталі та виробу в системі вирішення прямих та зворотних завдань при підтримці ЖЦВ. Показано, що вирішення прямої задачі – це створення АЕ з наступним виготовленням деталі, а вирішення зворотної задачі – навпаки: оцифрування існуючої реально фізичної деталі та створення АЕ.

4. Визначено основні параметри якості поверхонь авіаційних деталей і розглянуто методику розрахунку імовірного відсотку браку та точності форми і розташування поверхонь. Показано, що параметри якості поверхонь авіаційних деталей обов'язково закладаються при створенні АЕ деталі та виробу та є вирішальними при прийнятті рішення про пропуск деталі / виробу у виробництво на етапах контролю.

5. Виконано аналіз існуючих алгоритмів і підходів щодо створення АЕ/ЕМ та оброблення портретів – хмар точок на базі звичайного та сталого реверс-інжинірингу. Наведено методологію сталого реверс-інжинірингу та виконано порівняння зі звичайним.

6. На прикладі важеля клейового пістолету представлено та проаналізовано можливості використання сталого та звичайного реверс-інжинірингу при адитивному виробництві. Аналіз прототипування важеля показав, що представлений підхід можна буде використати на будь-яких авіаційних деталях.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ресурсозбереження. Стадії життєвого циклу виробів виробничо-технічного призначення: ГОСТ Р 53791-2010. (2011). Витягнуто з: <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=176612>.
2. Systems and software engineering - Content management for product life-cycle, user and service management documentation: ISO/IEC/IEEE 26531:2015. Витягнуто з: <https://www.iso.org/ru/standard/43090.html>.
3. Братухін А. Г. (ред.) (2001). Інформаційні технології в наукомісткому машинобудуванні. Комп'ютерне забезпечення індустріального бізнесу. Київ: Техніка.
4. Бичков, І. В., Планковський, С. І. & Романов, А. А. (2014). Життєвий цикл виробу та його інформаційний супровід. Автоматизація та управління технологічними процесами і виробництвами, 18, 1(62), 149-155.
5. Piegle, L. & Tiller, W. (1997). The NURBS book. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59223-2>
6. Катерина, Майорова, Юрій, Воробйов, Максим. Бойко, Валерія, Супоніна, Олег Комісаров (2021). Реалізація технології реінжинірингу для забезпечення заданої геометричної точності кіля легкого літака. Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій, 6/1 (114), 6-12. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246414
7. Бичков І. В., Ващук Ю. В. & Андрусик В. Ф. (2003). Інформаційний супровід процесу виробництва виробництва на машинобудівних підприємствах. Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, 22, 61-71.
8. Бичков І. В. (2010). Опис об'єкта виробництва для коректної постановки задачі формоутворення. Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, 45, 129-135.
9. Бычков И. В. (2011). Основи технологічної підготовки авіаційного виробництва складнопрофільних виробів на базі аналітичних моделей



- процесу формоутворення. (автореф. дис. ... доктора техн. наук).  
Національний аерокосмічний університет ім. Н. С. Жуковського  
М. С. Жуковського "ХАІ". Харків, Україна.
10. *Авіаційні правила. Норми льотної придатності винтокрилих апаратів нормальної категорії. Частина 27.* Вилучено з <https://avia.gov.ua/npdrrd/slug-2/>
  11. Норми льотної придатності гвинтокрилих апаратів транспортної категорії. <https://avia.gov.ua/npdrrd/slug-2/>
  12. Авіаційні правила. Частина 29. Вилучено з <https://avia.gov.ua/npdrrd/slug-2/>
  13. Свищева, Г. П. (ред.) (1994). *Авіація: енциклопедія*. Москва : ЦАГИ. Вилучено з <http://padaread.com/?book=37003>
  14. Матвеевко, А. М. (ред.) (2004). *Енциклопедія «Машиностроение»*. Том IV-14. Кн. 2. Москва : Машиностроение.
  15. Майорова, К. В. Реінжиніринг авіаційних об'єктів та порівняльний аналіз створення аналітичного еталону. *Авіація, промисловість, суспільство* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції (с. 377-380). 14 травня, 2020, Кременчук, Україна: ХНУВС.
  16. Bychkov, I., Maiorova, K., Suponina, V., & Riabikov, S. (2020). REENGINEERING BASED ON 3D-SCANNING IN THE PROCESS OF PROPELLER ANALYTICAL STANDARD CONSTRUCTING FOR AN ULTRA-LIGHT TWIN-SEAT AIRCRAFT. *Збірник наукових праць ЛОГОΣ*, 31-38. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.09>
  17. Technical research and development: collective monograph / Kalafat K., Vakhitova L., Drizhd V., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021. 616 p. Available at : DOI-10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I
  18. Доповідь Всесвітньої комісії з навколишнього середовища та розвитку (1987 р.) Додаток до документа Генеральної Асамблеї А/42/427. Найробі, Кенія. Організація Об'єднаних Націй, Нью-Йорк.
  19. Департамент з економічних і соціальних питань, Організація Об'єднаних

- Націй. <https://sdgs.un.org/> (останній доступ 2020.08.26)
20. Улла АММС, Фуджі А., Кубо А., Тамакі, Джунічі. Аналіз Стійкість біметалевих компонентів. Міжнародний журнал технологій автоматизації. 2014;8(5):745-53. doi: 10.20965/ijat.2014.p0745.
21. Улла АММС, Хасімото Х., Кубо А., Тамакі Дж. Аналіз стійкості швидкого прототипування: перспективи матеріалів/ресурсів і процесів. Міжнародний журнал сталого виробництва. 2013;3(1):20-36. doi: 10.1504/ijsm.2013.058640.
22. Вараді Т., Мартін Р. Р., Кокс Дж. Реверс-інжиніринг геометричної моделі, введення. Системи автоматизованого проектування. 1997;29(4):255-68. doi: 10.1016/S0010-4485(96)00054-1.
23. Buonamici F, Carfagni M, Furferi R, Governi L, Lapini A, Volpe Y. Методи та інструменти моделювання зворотного проектування: огляд. Комп'ютерний дизайн і додатки. 2018;15(3):443-64. doi: 10.1080/16864360.2017.1397894.
24. Бесл П. Дж., Маккей Н. Д. Спосіб реєстрації тривимірних фігур. IEEE Transactions з аналізу образів і машинного інтелекту. 1992;14(2):239-56. doi: 10.1109/34.121791.
25. Сюй Ф., Чжао С., Хагівара І. Дослідження автоматичної реєстрації у зворотному інжинірингу (механічні системи). Праці Японського товариства інженерів-механіків, серія С. 2010; 76 (771): 2861-9. doi: 10.1299/kikaic.76.2861.
26. Guan G, Wen-wen G. Реконструкція гребного гвинта і складної поверхні корпусу корабля на основі зворотного проектування. Журнал морської науки і техніки. 2019;27(6):498-504. doi: 10.6119/JMST.201912\_27(6).0002.
27. Араужо АМС, Олівейра ММ. Виявлення циліндрів на основі підключення в неорганізованих хмарах точок. Розпізнавання образів. 2020;100:107161. doi: 10.1016/j.patcog.2019.107161.
28. Морітані Р., Канаї С., Дате Х., Ватанабе М., Накано Т., Ямауті Ю. Одночасна реєстрація та підгонка моделі хмар точок, відсканованих

- лазером, на основі циліндра для точного моделювання трубопровідної системи. Комп'ютерний дизайн і додатки. 2018;15(5):720-33. doi: 10.1080/16864360.2018.1441239.
- 29.Массафра А., Праті Д., Предарі Г., Гуллі Р. Аналіз дерев'яних ферм, стратегії збереження та цифрова документація за допомогою параметричних даних. 3D-моделювання та робочий процес НВІМ. Стійкість. 2020;12(12):4975. doi: 10.3390/su12124975.
- 30.Цзен С., Чен Дж., Чо Ю.К. Витяг елементів будівлі на основі користувацьких зразків з необроблених хмар точок з використанням функцій глибокого рівня точок. Автоматизація в будівництві. 2020;114:103159. doi:10.1016/j.autcon.2020.103159. 8
- 31.Менгоні М., Леопарді А. Дослідницьке дослідження застосування реверс-інжинірингу в галузі малих археологічних артефактів. Комп'ютерний дизайн і додатки, 2019; 16(6):1209-26. doi: 10.14733/cadaps.2019.1209-1226.
- 32.Наня Т., Йошихара Х., Маєкава Т. Реконструкція повних 3D-моделей за допомогою інтеграції вокселів. допомогою інтеграції вокселів. Журнал передового механічного проектування, систем і виробництва. 2013;7(3):362-76. doi: 10.1299/jamdsm.7.362.
- 33.Захос П.К., Паппа М., Калфас А.І., Мансур Г., Ціафіс І., Пілідіс П. та ін. Оцінка характеристик лопаток турбіни з використанням інструментів сканування геометрії та прогнозування поля потоку. Журнал енергетики та енергетичних систем. 2008;2(6):1345-58. doi: 10.1299/jpes.2.1345.
- 34.Сегрето Т., Боттільо А., Каджіано А., Мартореллі М. Інтеграція процедур зворотного проектування та ультразвукового безконтактного тестування для оцінювання якості авіаційних компонентів із вуглепластика. Процедура ЦРП. 2019;79:343-8. doi:10.1016/j.procir.2019.02.082.
- 35.Yang Y, Fang H, Fang Y, Shi S. Алгоритм вилучення тонких ознак тривимірних даних хмари точок для вимірювання лазерним скануванням великомасштабної нерівної поверхні у зворотному проектуванні.

- Вимірювання. 2020;151:107220. doi:10.1016/j.measurement.2019.107220.
- 36.Боннічі А., Акман А., Каллеха Г., Каміллері К.П., Фелінг П., Феррейра А. та ін. Взаємодія та моделювання на основі ескізів: де ми знаходимося? Штучний інтелект для інженерного проектування, аналізу та виробництва. 2019;33(4):370-88. doi: 10.1017/S0890060419000349.
- 37.Танака М., Терано М., Хігасіно С., Асано Т. Метод навчання реконструкції 3D-моделей за ескізами, Комп'ютерне проектування та додатки, 2019; 16(6):1158-70. doi: 10.14733/cadaps.2019.1158-1170.
- 38.Монлаук Дж., Шах Г.А., Полетт А., Перно Дж.П. Генерація хмар точок після сканування для віртуального зворотного проектування моделей збірки САПР, Комп'ютерне проектування та додатки, 2019; 16 (6): 1171-82. doi: 0.14733/cadaps.2019.1171-1182
- 39.Таші, Улла А.С., Ватанабе М., Кубо А. Аналітичне геометричне моделювання на основі хмари точок. моделювання на основі хмари точок для адитивного виробництва та його застосування для збереження культурної спадщини. Прикладні науки. 2018;8(5):656. дої: 10.3390/app8050656.
- 40.Таші, Улла А.С. Симетричні моделі спадщини айнів та їх віртуальне і фізичне прототипування. Симетрія. 2019;11(8):985. дої: 10.3390/sym11080985.
- 41.Таші, Улла А.С., Кубо А. Геометричне моделювання та 3D-друк з використанням рекуррентно згенерованої хмари точок. Математичні та обчислювальні додатки. 2019;24(3):83. doi: 10.3390/mca24030083.
- 42.Улла АММС, Оморі Р., Нагара Ю., Кубо А., Тамакі Дж. На шляху до безпомилкового виробництва фракталів. Процедура ЦРП. 2013;12:43-8. doi: 10.1016/j.procir.2013.09.009.
- 43.Таші, Улла АММС, Кубо А. Розробка підходу зворотного проектування на основі людського пізнання. Матеріали конференції JSME 2020 з передових технологій виробництва/матеріалів та обробки (LEMP2020), 22-26 червня 2020 р., Цинциннаті, Огайо, США.

44. Additive Manufacturing Technologies / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani // Springer, Cham, 2021. – p. 675, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
45. Адитивні технології та матеріали: навч. посібник / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, В.М. Малець. – Луцьк : ЛНТУ, 2022. – 272 с. ISBN 978-617-8018-36-8.
46. Additive Manufacturing: A Tool for Industrial Revolution 4.0 / Manjiaiah, M. Raghavendra, K. Balashanmugam, N. Davim, P.J., Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series. 2021, p. 324. ISBN: 978-0-12-822057-3.
47. Гречко А.М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – №1. – С. 63-75. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12>.
48. Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд) / О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, М.Г. Кораб // "Автоматичне зварювання", 2020. – № 5. – С. 53-60. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>.
49. F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, A. Lapini, Y. Volpe (2018) Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. Computer-Aided Design & Applications, 2018, 15(3), P.443–464. <https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1397894>.
50. Gerbino, S., Martorelli, M. (2023). Reverse Engineering. In: Pei, E., et al. Springer Handbook of Additive Manufacturing. Springer Handbooks. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_16).
51. Saiga, K.; Ullah, A.S.; Kubo, A.; Tashi. A Sustainable Reverse Engineering Process. Procedia CIRP Volume 98, 2021, PP 517-522. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.144>.
52. MeshLab. Url - <https://www.meshlab.net>.