

УДК 629.735.083.3:004.942:621.9.08

doi: 10.32620/aktt.2025.3.07

К. В. МАЙОРОВА

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТИПОВИХ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ПІДЛЯГАЮТЬ ВИРОБНИЦТВУ АБО РЕМОНТУ ЗА ТЕХНОЛОГІЯМИ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГУ

Предметом вивчення є процес відновлення зруйнованих або пошкоджених елементів авіаційної техніки за допомогою методів реверс-інжинірингу (PI) у випадках, коли відсутня конструкторська документація, а сама техніка потребує термінового повернення в експлуатацію. **Метою** є обґрунтування ефективності використання технологій реверс-інжинірингу для створення цифрових моделей та технічної документації в польових умовах, а також систематизація типових авіаційних деталей за критерієм придатності до сканування та прототипування. **Завдання:** визначити категорії деталей авіаційних об'єктів (АО), що можуть бути оперативно відновлені безпосередньо на місці експлуатації; проаналізувати види пошкоджень, для яких використання PI є найбільш доцільним; сформувати класифікатор деталей і вузлів АО з урахуванням їх геометрії, розмірів, матеріалу та технічних вимог до точності відновлення; розробити алгоритм вибору оптимального методу сканування та моделювання. **Використовуваними методами** є структурно-функціональний аналіз геометрії типових авіаційних деталей, технічна оцінка можливостей оптичного та контактного 3D-сканування, побудова полігональних моделей, CAD-моделювання, дзеркальне відтворення парних елементів, а також систематизація на основі емпіричних спостережень та технічної апробації в умовах мобільного обслуговування. **Отримані такі результати:** сформовано деталізований класифікатор деталей та вузлів АО у 11 категоріях залежно від форми, наявності отворів, жорсткості та конструктивної складності; виявлено типові пошкодження, що можуть бути усунені методами PI; обґрунтовано ефективність використання дзеркального сканування парних деталей при відсутності оригінального еталона. Встановлено критичні чинники, що впливають на якість сканування. **Висновки:** методика, представлена у статті, дозволяє здійснювати технічно обґрунтоване відновлення авіаційних деталей з використанням засобів реверс-інжинірингу навіть у польових умовах, без необхідності використання оригінальної документації. Класифікатор дозволяє швидко ідентифікувати тип пошкодженої деталі, вибрати відповідний тип сканування та спосіб створення CAD-моделі. Ефективність доведено для як для елементів аеродинамічного обводу, так і для рухомих з'єднань типу «вал-в-отворі», де після дефектації зношеної пари можливо створити новий парний компонент з високою точністю.

Ключові слова: реверс інжиніринг; 3D-сканування; відновлення авіаційних деталей; класифікатор елементів конструкції; польовий ремонт авіатехніки.

Вступ

Мотивацією даного дослідження стала нагальна потреба забезпечити ефективні підходи до відновлення техніки у польових умовах за відсутності конструкторської документації та обмежених виробничих ресурсів.

Сучасні методи реверс-інжинірингу дають змогу оперативно створювати цифрові двійники пошкоджених елементів, що дозволяє забезпечити їх виготовлення чи ремонт без залучення заводів-виробників.

Тому автор поставив собі за мету розробити систематизований підхід до відновлення типових авіаційних деталей та конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу, зокрема, в умовах мобільного обслуговування.

Далі буде запропоновано узагальнений класифікатор деталей авіаційних об'єктів (АО) за критерієм придатності до сканування, який дозволить обґрунтовано обрати метод отримання цифрової моделі залежно від геометрії, матеріалу та умов експлуатації.

Методичний підхід базується на аналізі практичних випадків використання засобів PI у поєднанні з CAD-моделюванням, контактним і безконтактним 3D-скануванням, а також на побудові полігональних моделей і формуванні технічної документації для відновлення. Підхід орієнтовано на зменшення часу простою техніки та забезпечення відновлення без передачі агрегатів на стаціонарні ремонтні підприємства.

Особливу увагу необхідно звернути на техніку, що зазнала легких пошкоджень. Її можна і доцільно,



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

з огляду на події останніх років в Україні, ремонтувати в польових умовах – у безпосередній близькості до місця використання. У разі серйозних пошкоджень техніку слід відправляти на ремонт до спеціалізованих підприємств.

1. Аналіз стану питання

На теперішній час склалася така ситуація, коли в країні використовується велика кількість різноманітної закордонної техніки, що постачається країнами-партнерами. Особливістю цієї техніки є те, що вона:

- є складним інженерним продуктом;
- працює в небезпечних умовах зі значним ризиком пошкодження;
- через об'єктивні умови не може вчасно і якісно обслуговуватися;
- дуже потрібна у працездатному стані;
- потребує швидкого ремонту після пошкодження;
- має складові елементи зі складними просторовими формами;
- має логістичні складнощі з постачанням запасних частин, або запчастини до неї вже не виготовляються;
- має бути якнайшвидше уведена до експлуатації після пошкодження.

Звичайно, техніку, що має важкі пошкодження слід відправляти для ремонту на спеціалізовані підприємства. Але легко пошкоджену техніку варто ремонтувати в полі, в безпосередній близькості від місця використання. Завадою для цього, крім наведених вище причин є брак будь-якої конструкторської документації (КД) на пошкоджені деталі. Швидким рішенням в таких випадках є використання реверс-інжинірингу (РІ), який виконує низку різноманітних завдань, основним серед яких є отримання електронного образу (портрету і аналітичного еталону) пошкодженої деталі для подальшої роботи з її відновлення за допомогою засобів автоматизованого

проскитування. Також важливим чинником використання РІ є і те, що майже усі складові деталі авіаційної і наземної техніки мають симетрично віддзеркалену пару. А це означає, що стає дуже просто створити тривимірну модель пошкодженої чи зруйнованої деталі шляхом сканування форми її вцілілої парної та його віддзеркалення.

Таким чином створюється технічна документація (ТД), використання якої за допомогою верстатів, обладнання та інструментів, якими комплектуються мобільні майстерні типу пересувних аварійно-ремонтних майстерень та рухомих модулів технічного обслуговування, ведуться роботи з розбирання-складання, виготовлення болванок та виколочування по них металевих деталей з листа або форм для виклювання композитних деталей, отримання деталей механічним обробленням.

Проаналізуємо, які саме деталі авіаційного об'єкту (АО) можна відновити методом РІ. Логічно припустити, що це мають бути деталі, що формують зовнішні аеродинамічні контури виробу. Перш за все виключаємо з розгляду силові деталі та елементи конструктивно-силової схеми. Вони мають ремонтуватися та відновлюватися виключно на спеціалізованих авіаремонтних підприємствах. Також не будемо розглядати плоскі панелі та панелі поодинокі кривизни – вони легко відновлюються і без використання комп'ютерних технологій. Таким чином доходимо висновку, що найпридатнішими до відновлення методом РІ є панелі подвійної кривизни, обтічники, накривки та ковпаки антен радіоелектронного обладнання АО, лючки, залізи, закінцівки, кронштейни навіски тощо. Окремо зазначимо обшивки носків крил, стабілізаторів та кілів, які, хоча і є елементами з одинарною кривизною, але мають крутовигнутий профіль, точність виготовлення якого критично впливає на аеродинамічні характеристики АО. Крім того, в такий спосіб можна ремонтувати і невеликі рульові поверхні, на кшталт хвостових стабілізаторів на балці вертольоту чи літака (рис. 1).

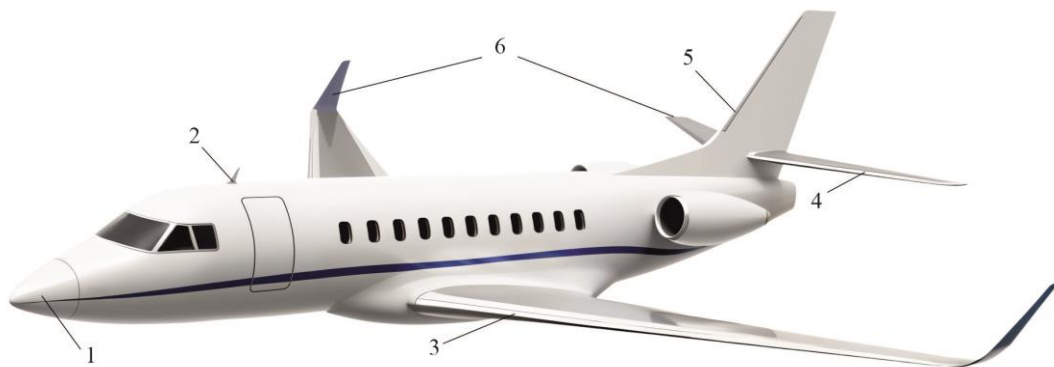


Рис. 1. Типові елементи аеродинамічних обводів, які можна легко відновити або відремонтувати:
1 – носовий обтічник; 2 – накривки антен радіоелектронного обладнання; 3 – обшивка носка крила;
4 – обшивка носка стабілізатора; 5 – обшивки носків кілів; 6 – закінцівки крила та стабілізатора

Усі ці елементи мають розміри від десятків сантиметрів до метра й більше, виготовляються з алюмінієвих сплавів або полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Типові види руйнування агрегатів та вузлів АО, що піддаються швидкому відновленню методом РІ показано на рис. 2 – 5. Як відзначалося раніше, це можуть бути відносно незначні пошкодження: пробоїни, розриви, деформування, часткова втрата елементів конструкції. Основною суттю ремонту в таких випадках є ліквідація наскрізних дефектів, які не лише погіршують аеродинамічні характеристики. Проникнення крізь них потоку повітря, що набігає під час польоту, викликає значне підвищення внутрішнього тиску агрегату АО до таких значень, що призводять аж до його руйнації зсередини.



Рис. 2. Значні пошкодження носового обтічника літака [1]



Рис. 3. Пошкодження передньої кромки лівого крила [2]

Крім деталей фюзеляжу, крил та оперення АО за методом РІ можна спростити та пришвидшити тимчасовий ремонт деталей інших систем, який має бути проведений негайно [5]. За таким підходом найефективніше ремонтувати рухливі з'єднання пар деталей

за типом «вал-в-отворі». Це, наприклад, вісь і втулка, в якій вона обертається, кронштейни і качалки системи керування, плунжерні пари гідросистем [6, 7] тощо. Суть робіт полягає в тому, що спершу деталі з пари дефектуються і виявляється, яка з них зношена менше. Далі шляхом її сканування визначається реальна існуюча форма і розміри зношених посадкових місць. Далі виготовляється нова парна деталь, розміри якої забезпечують як-найкращу відповідність до них [8].



Рис. 4. Часткове пошкодження обшивки передньої кромки стабілізатора [3]



Рис. 5. Concorde, який отримав пошкодження керма напрямку [4]

2. Систематизація деталей, вузлів та агрегатів АО за умови можливості їх прототипування РІ

Отже зазначимо, що конструкція АО характеризується багатодетальністю та багатонаменклатурністю, а також великою кількістю використовуваних технологічних процесів для їх виготовлення. Тому для скорочення технологічних процесів сканування та створення АЕ в ході виконання досліджень було систематизовано деталі та вузли АО в класифікатор (рис. 6). Останнє дозволило зробити висновки щодо можливостей використання методів РІ для різних груп деталей класифікатора. В основу його створення

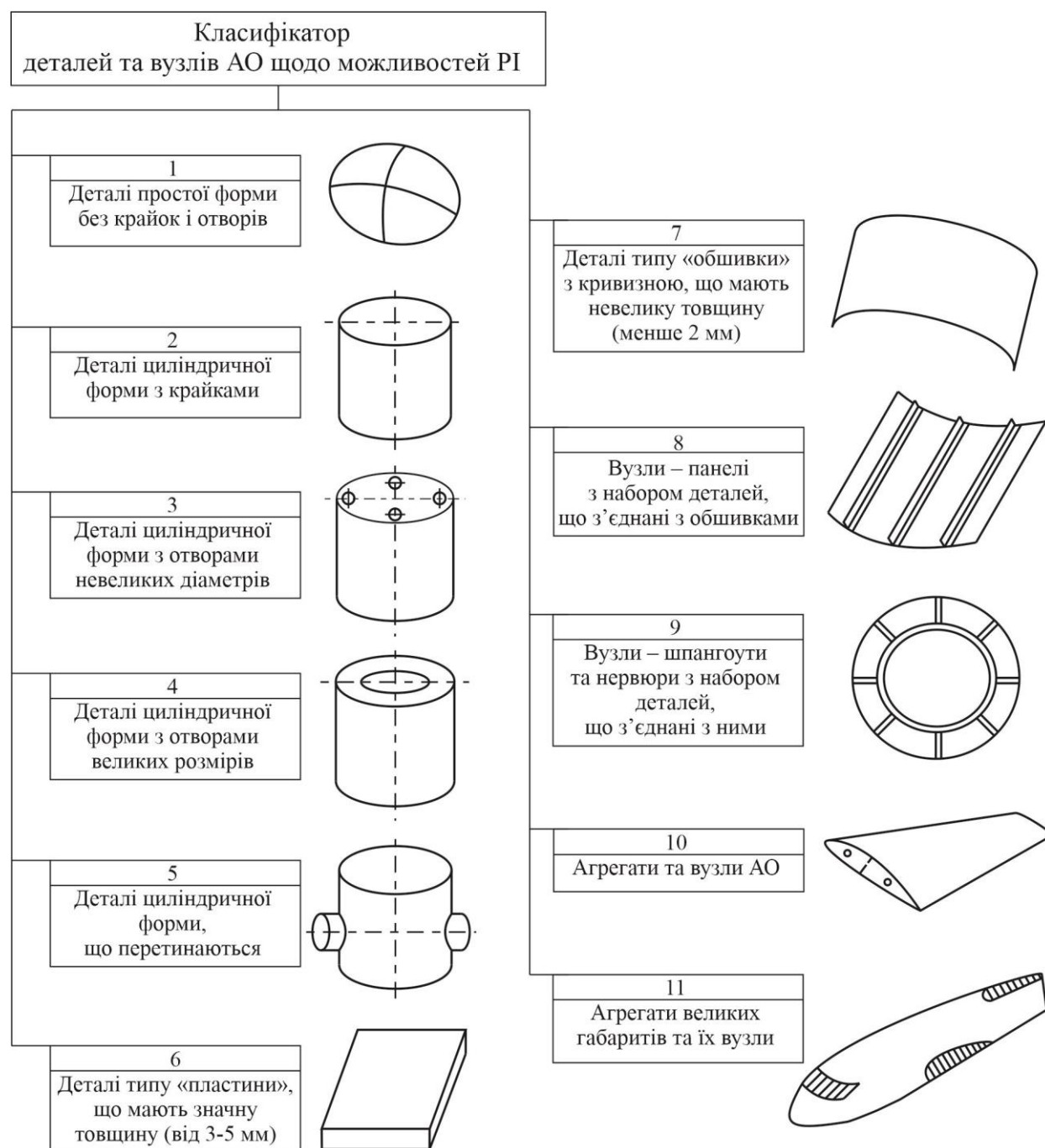


Рис. 6. Класифікатор деталей та вузлів АО щодо можливостей РІ

було закладено ідею щодо можливості прототипування тієї чи іншої групи деталей в залежності від технічних можливостей різних сканерів та інших вимірювальних пристроїв, а також встановлення необхідного обладнання для реалізації самого процесу прототипування. Враховано також і те, що при використанні оптичних сканерів на прозорих, чорних або блискучих деталях перед скануванням їх необхідно попередньо заматовувати (нанести тальк). Це частково стосується і лазерних сканерів, що використовують технологію червоної лазерної лінії.

Для сканерів із синім лазером проблеми виникатимуть лише з прозорими об'єктами.

При формуванні класифікатора з вибору приладу враховано те, що для отримання полігональної моделі з високою точністю (0,05 мм) напряму впливає точність виготовлення деталі, а на точність крайок – розподільча здатність сканеру. Досвід показує, що крайки з заокругленням 0,1 мм оптичними сканерами скануються з точністю не більше 0,1 мм, що недостатньо для оцінки якості поверхонь крайки. Останнє вирішується комбінацією КВМ типу «рука»

зі сканером та/або щупом, оскільки точність контактних вимірів на порядок краща за безконтактні.

Для сканування вузлів, агрегатів їх попередньо розбирають на деталі, щоб кожну окремо оцифрувати.

В класифікаторі також враховано наступні особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним способом сканування.

2.1. Класифікатор деталей та вузлів АО щодо можливостей РІ

1. Деталі простої форми без крайок і отворів:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості (маркери, скотч тощо) для спрощення об'єднання отриманих відсканованих поверхонь в портрет.

2. Деталі циліндричної форми з крайками:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°.

3. Деталі циліндричної форми з отворами невеликих діаметрів:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь має отвори, то їх необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень (щоб в результаті отримати достатню кількість інформації про цей отвір);

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°. Отвори необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень, щоб в результаті отримати достатню кількість інформації з геометрії про цей отвір. Також необхідно враховувати, що через особливості принципу роботи лазерних сканерів, можна отримати так званий «ефект чаші», коли лазер фізично не може зібрати інформацію про глибину отворів на більше ніж діаметр цього отвору

4. Деталі циліндричної форми з отворами великих розмірів:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь має отвори, то їх необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень (щоб в результаті отримати достатню кількість інформації про цей отвір);

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°. Отвори необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень, щоб в результаті отримати достатню кількість інформації з геометрії про цей отвір. Також необхідно враховувати, що через особливості принципу роботи лазерних сканерів, можна отримати так званий «ефект чаші», коли лазер фізично не може зібрати інформацію про глибину отворів на більше ніж діаметр цього отвору.

5. Деталі циліндричної форми, що перетинаються:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки та місця перетинів скануються під 90°.

6. Деталі типу «пластини», що мають значну товщину (від 3-5 мм):

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь жорстка її можна поставити на підставку і сканувати в одному положенні, якщо вона має ідентичну геометрію з обох сторін і нам необхідно відсканувати іншу сторону тільки задля отримання інформації про товщину, якщо ж вона має різну геометрію бажано сканувати в 3х положеннях (знизу, зверху, на ребрі). Якщо деталь не жорстка, то сканування рекомендується виконувати тільки в одному положенні;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що є жорстка, можна поставити її на підставку і сканувати в одному положенні. При цьому вона має мати ідентичну геометрію з обох сторін, а необхідність відсканування іншої сторони є тільки задля отримання інформації про товщину. Якщо ж вона має різну геометрію бажано сканувати в 3х положеннях (знизу, зверху, на ребрі). Якщо деталь не жорстка, то

сканування рекомендується виконувати тільки в одному положенні. Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°. Якщо деталь не має криволінійних поверхонь її можна просто виміряти контактним способом.

7. Деталі типу «обшивки» з кривизною, що мають невелику товщину (менше 2 мм):

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь не жорстка і має тонку геометрію, то сканування рекомендується виконувати тільки в одному положенні (лежачі);

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань.

8. Вузли – панелі з набором деталей, що з'єднані з обшивками:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°.

9. Вузли – шпангоути та нервюри з набором деталей, що з'єднані з ними:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Скануємо з багатьох ракурсів, а також мінімум з 3х положень.

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°.

10. Агрегати та вузли АО:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Крайки скануються під 90°.

11. Агрегати великих габаритів та їх вузли:

- при отриманні полігональної моделі за допомогою сканерів необхідно враховувати, що на кожен

кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Для підвищення точності можна додатково використовувати фотограмметричні набори;

- при застосуванні КВМ типу «рука» на деталь, що сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань.

З перелічених особливостей застосування для кожної групи деталей можна зробити наступні узагальнення.

Для оптичних сканерів на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь має отвори, то їх необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень, щоб в результаті отримати достатню кількість інформації з геометрії про цей отвір. Деталі достатньої жорсткості можна поставити на підставку і сканувати в одному положенні. При ідентичній геометрії з обох сторін, достатньо відсканувати одну сторону і торцеву задля отримання геометрії товщини. За умови різної геометрії сканувати слід в 3х положеннях (знизу, зверху, на ребрі). Не жорсткі деталі сканують тільки в одному положенні. Великогабаритні деталі скануються за допомогою додаткових фотограмметричних наборів.

Для КВМ типу «рука» обов'язково додавати геометричні особливості (маркери, скотч тощо) з усіх боків дослідної деталі для спрощення об'єднання отриманих відсканованих поверхонь в портрет. Крайки скануються під 90°. Отвори необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень, щоб в результаті отримати достатню кількість інформації з геометрії про цей отвір. Також необхідно враховувати, що через особливості принципу роботи лазерних сканерів, можна отримати так званий «ефект чаші», коли лазер фізично не може зібрати інформацію про глибину отворів на більше ніж діаметр цього отвору.

3. Приклад реалізації та дискусія

3.1. Приклад реалізації

Застосування класифікатора дає змогу швидко оцінити до якої групи деталей відноситься пошкоджена або зруйнована деталь та використати технології реверс-інжинірингу найбільш ефективно, не витрачаючи час на додатковий аналіз. Для прикладу реалізації ремонту з застосуванням представленої методики показано суть реалізації у вигляді таблиці 1.

3.2. Дискусія

Дискусійним моментом залишається знаходження можливих шляхів для максимального збільшення терміну експлуатації відновлених елементів.

Таблиця 1

Приклади застосування класифікатора для реалізації ремонту за методом PI

№	Ситуація	Категорія класифікатора	Суть реалізації
1	Відновлення дверей вантажного відсіку БПЛА	П. 6 – Пластини (3–5 мм). П. 8 – Панелі з обшивками.	Сканування непошкодженої частини, побудова моделі, формування шаблону та виготовлення нової кришки з алюмінієвого листа.
2	Ремонт кронштейна підвіски на зовнішньому пілоні вертольота	П. 2 – Циліндрична форма з крайками. П. 5 – Перехрещення	Сканування деталі з декількох положень, реконструкція форми, відновлення отворів і поверхонь за допомогою CAD-моделі.
3	Прототипування кріплення антенного блоку з композитного корпусу	П. 3 – Циліндрична форма з малими отворами. П. 7 – Обшивка.	Відскановано фрагмент, створено модель з посиленням, надруковано 3D-прототип і виготовлено форму для композитного лиття.
4	Ремонтна вставка для фланця трубопроводу гідросистеми	П. 4 – Циліндрична форма з великими отворами. П. 10 – Агрегати.	Сканування з еталонної частини, побудова цифрової вставки, точне фрезерування та герметизація з'єднання.
5	Прототипування оглядового люка з новим посадковим отвором під замок	П. 1 – Прості форми без крайок і отворів.	Створення нової моделі люка із врахуванням геометрії поверхні та встановлення альтернативного кріплення.

Було встановлено, що для несилкових елементів, що не піддаються значним навантаженням, використання PI дозволяє не лише скоротити час простою техніки, але й суттєво знизити витрати на логістику та постачання оригінальних запасних частин. При застосування PI для силових деталей або з'єднань типу «вал-в-отворі» рекомендується застосовування додаткових перевірок – як геометричних, так і експлуатаційних характеристик.

Класифікація деталей АО, проведена в межах дослідження, виявила найбільшу ефективність застосування PI саме для панелей подвійної кривизни та елементів з достатньою жорсткістю і відносною простотою геометрії. Обмеженням залишаються прозорі, блискучі або надмірно тонкі деталі, які складно відсканувати без попередньої підготовки (наприклад, заматування поверхні).

Загалом, продемонстрована методика дозволяє сформувати технічну документацію в польових умовах, інтегрувати процес сканування з мобільними ремонтними модулями та пришвидшити відновлення критично важливих компонентів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на підвищення точності сканування, автоматизацію побудови CAD-моделей та оптимізацію процесів механічної обробки в умовах обмежених ресурсів.

Висновки

1. Сучасні умови експлуатації великої кількості закордонної техніки в Україні створюють нагальну потребу в оперативному ремонті зруйнованих елементів без наявності повної конструкторської документації. У таких випадках застосування технології реверс-інжинірингу (PI) є ефективним рішенням.

2. Аналіз показав, що найбільш доцільним є застосування PI для відновлення зовнішніх аеродинамічних елементів авіаційних об'єктів (АО), таких як обтічники, накривки, панелі подвійної кривизни, носові частини крил і стабілізаторів, а також незначно пошкоджених рульових поверхонь.

3. Відновлення таких деталей можливе завдяки симетричності конструкцій – створення моделі пошкодженого елемента може здійснюватися на основі віддзеркаленого скану його парного аналога.

4. Застосування PI дозволяє створити електронний портрет деталі для подальшого проектування, виготовлення болванок, форм, а також формування технічної документації для мобільних ремонтних модулів.

5. Ефективність технології PI підтверджено також для деталей типу «вал-в-отворі», таких як кронштейни, втулки та плунжерні пари, де після скану-

вання менш зношеної пари виготовляється нова сумісна деталь.

6. Проведена класифікація деталей та вузлів АО за критерієм придатності до сканування дозволила систематизувати вибір методів та засобів вимірювання. Враховано специфіку роботи оптичних і контактних сканерів (КВМ типу «рука»), а також обмеження, пов'язані з геометрією, матеріалом і жорсткістю деталей.

7. Встановлено, що:

- для досягнення високої точності (до 0,05 мм) критичним є вибір відповідного сканера та методу фіксації деталі;
- прозорі, чорні або блискучі поверхні потребують додаткової підготовки (матування);
- отвори та крайки слід сканувати під різними кутами з багатьох ракурсів;
- великогабаритні об'єкти потребують фотограмметричної підтримки.

8. Застосування систематизованого підходу до сканування дозволяє підвищити точність моделювання та скоротити час, необхідний на підготовку до ремонту. Це критично важливо в умовах обмежених ресурсів та необхідності відновлення техніки безпосередньо в зоні експлуатації.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Veillette, P. *Know Your Radome: An Important Structure, Part 1* [Electronic resource] / P. Veillette // *Aviation Week Network*, 30 January 2023. – Access mode: <https://aviationweek.com/business-aviation/safety-ops-regulation/know-your-radome-important-structure-part-1> (accessed 18 April 2025).

safety-ops-regulation/know-your-radome-important-structure-part-1 (accessed 18 April 2025).

2. *Damage to Leading Edge of Left Wing* [Electronic resource] / *Aerossurance*, 04 May 2018. – Access mode: <https://aerossurance.com/safety-management/uncontained-cfm56-failure-b737/attachment/figure-3-damage-to-leading-edge-of-left-wing/> (accessed 18 April 2025).

3. *Loss of Engine Power (Partial): Cessna 170, N4087V; Accident Occurred January 27, 2019 in Selah, Yakima County, Washington* [Electronic resource] / *Kathryn's Report*, 02 March 2019. – Access mode: <http://www.kathrynsreport.com/2019/03/cessna-170-n4087v-accident-occurred.html> (accessed 18 April 2025).

4. *How Badly Can Tail Damage Impact an Aircraft's Safety?* [Electronic resource] / *Simple Flying*. – Access mode: <https://simpleflying.com/tail-damage-impact-on-aircraft-safety/> (accessed 18 April 2025).

5. *Reverse Engineering Used to Profile a Gerotor Pump Rotor* [Electronic resource] / N. Baroiu, V. G. Teodor, V. Păunoiu., G.-A. Moroşanu, & I.-C. Dumitrescu // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, no. 19. – Article no. 11069. DOI: 10.3390/app131911069.

6. *Leveraging Additive Manufacturing and Reverse Engineering for Circular Economy-Driven Remanufacturing of Hydraulic Drive System Components* [Electronic resource] / A.-P. Chiriţă, A.-M. Borş, R.-I. Rădoi, I.-C. Dumitrescu, & A.-M. C. Popescu // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, no. 22. – Article no. 12200. DOI: 10.3390/app132212200.

7. *Maiorova, K. Study of the Features of Permanent and Usual Reverse-Engineering Methods of Details of Complex Shapes* [Text] / K. Maiorova, O. Kapinus, & O. Skyba // *Technology Audit and Production Reserves* – 2024. – Vol. 1, no. 1 (75). – P. 19-25. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.297768.

8. *Confalone, G. 3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction* [Text] / G. Confalone, J. Smits, & T. Kinnare. – Hoboken : Wiley, 2023. – 224 p. DOI: 10.1002/9781119758532.

References

1. Veillette, P. *Know Your Radome: An Important Structure, Part 1*. *Aviation Week Network*. Available at: <https://aviationweek.com/business-aviation/safety-ops-regulation/know-your-radome-important-structure-part-1> (accessed 18 April 2025).

2. *Damage to Leading Edge of Left Wing*. *Aerossurance*. Available at: <https://aerossurance.com/safety-management/uncontained-cfm56-failure-b737/attachment/figure-3-damage-to-leading-edge-of-left-wing/> (accessed 18 April 2025).

3. Loss of Engine Power (Partial): Cessna 170, N4087V; Accident Occurred January 27, 2019 in Selah, Yakima County, Washington. *Kathryn's Report*. Available at: <http://www.kathrynsreport.com/2019/03/cessna-170-n4087v-accident-occurred.html> (accessed 18 April 2025).

4. How Badly Can Tail Damage Impact an Aircraft's Safety? *Simple Flying*. Available at: <https://simpleflying.com/tail-damage-impact-on-aircraft-safety/> (accessed 18 April 2025).

5. Baroiu, N., Teodor, V. G., Păunoiu, V., Moroşanu, G.-A., & Dumitrescu I.-C. Reverse Engineering Used to Profile a Gerotor Pump Rotor. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 19, article no. 11069. DOI: 10.3390/app131911069.

6. Chiriță, A.-P., Borş, A.-M., Rădoi, R.-I., Dumitrescu, I.-C., & Popescu, A.-M. C. Leveraging Additive

Manufacturing and Reverse Engineering for Circular Economy-Driven Remanufacturing of Hydraulic Drive System Components. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no 22, article no. 12200. DOI: 10.3390/app132212200.

7. Maiorova, K., Kapinus, O., & Skyba, O. Study of the features of permanent and usual reverse-engineering methods of details of complex shapes. *Technology audit and production reserves: Industrial and technology systems. Mechanical Engineering Technology*, 2024, vol. 1, no. 1 (75), pp. 19-25. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.297768.

8. Confalone, G., Smits, J., & Kinnare, T. *3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction*. Hoboken, Wiley, 2023. 224 p. DOI: 10.1002/9781119758532.

Надійшла до редакції 08.02.2025, розглянута на редколегії 20.05.2025

STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF TYPICAL AIRCRAFT PARTS AND STRUCTURES SUBJECT TO MANUFACTURING OR REPAIR USING REVERSE ENGINEERING TECHNOLOGIES

Kateryna Maiorova

The **subject** of the study is the process of restoring destroyed or damaged components of aircraft equipment using reverse engineering (RE) methods, particularly in situations where design documentation is unavailable and the equipment requires urgent return to service. The **aim** is to justify the effectiveness of reverse engineering technologies for generating digital models and technical documentation under field conditions, as well as to systematize typical aircraft components based on their suitability for scanning and prototyping. The **tasks** include: identifying categories of aircraft object (AO) components that can be promptly restored on-site; analyzing types of damage for which RE methods are most appropriate; developing a classifier of AO components and assemblies based on their geometry, size, material, and restoration accuracy requirements; and formulating an algorithm for selecting optimal scanning and modeling methods. The **methods** used include structural and functional analysis of the geometry of typical aircraft parts, technical evaluation of the capabilities of optical and contact 3D scanning, generation of polygonal models, CAD modeling, mirror reproduction of paired elements, and systematization based on empirical observations and technical testing under mobile maintenance conditions. The following **results** were obtained: a detailed classifier of AO components and assemblies was developed, comprising 11 categories based on shape, presence of holes, rigidity, and structural complexity; typical damage types that can be repaired using RE methods were identified; the effectiveness of mirror scanning of symmetrical paired parts in the absence of original reference components was substantiated. Critical factors affecting scanning quality were established. **Conclusions:** the methodology presented in the article enables technically sound restoration of aircraft components using reverse engineering tools, even under field conditions, without the need for original design documentation. The proposed classifier facilitates rapid identification of the damaged part type and selection of suitable scanning and CAD modeling techniques. The method has proven effective for both aerodynamic elements and moving joints of the "shaft-in-hole" type, where a new compatible part can be created based on the less worn component.

Keywords: reverse engineering; 3D scanning; aircraft component restoration; structural element classifier; field repair of aircraft.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Kateryna Maiorova – PhD, Docent, Head of the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kate.maiorova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3949-0791, Scopus Author ID: 57204427689.