

*Є. М. ІВАНОВ***ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОГРАМЕТРІЇ ПРИ ЗВОТНОМУ ПРОЄКТУВАННІ ОБ'ЄКТІВ
МАШИНОБУДУВНОЇ ГАЛУЗІ**

Для відтворення об'єкта у вигляді віртуальної моделі за наявною фізичною деталлю в роботі запропоновано використання хмарного сервісу Autodesk ReCap Photo. Використовуючи який можна створювати віртуальні тривимірні моделі за допомогою лазерного сканування реально-го об'єкта або за допомогою цифрової камери і подальшого цифрового відтворення цього об'єкта в цифровому просторі. Але широке використання лазерних сканерів та програмного забезпечення дуже обмежене через їхню дорожнечу. В роботі запропоновано більш дешевий, доступний і не менш точний метод, який легко застосувати на практиці - метод цифрової фотограмметрії реверс-інжинірингу. Метод заснований на створенні тривимірної моделі з двовірних фотографій за допомогою запропонованого програмного забезпечення. З його допомогою користувач завантажує на сервери Autodesk комплект фотографій і отримує в результаті триангульовану модель об'єкта зі збереженням усіх реальних розмірів і з текстурами високої якості. Отримані дані згодом було імпортовано для подальшого опрацювання в іншу програму цього сімейства - пакет Autodesk Inventor. Пакет Autodesk Inventor має зручний інтерфейс та великий набір інструментів для моделювання машинобудівних виробів. Для демонстрації масштабу і рівня опрацювання ReCap Photo, в роботі демонструються закладені в додаток опції: насамперед, додаток підтримує майже всі формати файлів лазерного сканування. Хмари точок, крім цього, можна редагувати довільно - видаляти їх, копіювати, підсвічувати або навіть додавати точки обстеження. У результаті продемонстровано можливість не тільки створювати технічну документацію, а й проводити реконструкції об'єктів з точністю до міліметра. Візуалізація і дизайн дають змогу виключати ймовірні помилки. Продемонстровано, що на основі таких моделей можна проєктувати й отримувати робочу документацію. Завдяки ідентичності просторової віртуальної моделі та реального фізичного об'єкта, точність і якість проєктування підвищується. Таким чином, наочно показано, що представлена методика істотно знижує трудомісткість і підвищує ефективність.

Ключові слова: просторова віртуальна модель, фотограмметрія, реверс-інжиніринг, ReCap Photo, Autodesk Inventor

*E. IVANOV***APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRY IN REVERSE ENGINEERING
OF MACHINE-BUILDING FACILITIES**

To recreate an object in the form of a virtual model based on an existing physical detail, the paper proposes to use the Autodesk ReCap Photo cloud service. Using this service, it is possible to create virtual three-dimensional models by laser scanning a real object or using a digital camera and subsequent digital reproduction of this object in digital space. However, the widespread use of laser scanners and software is very limited due to their high cost. The paper proposes a cheaper, more accessible and no less accurate method that is easy to apply in practice - the method of digital reverse engineering photogrammetry. The method is based on creating a three-dimensional model from two-dimensional photographs using the proposed software. With its help, the user uploads a set of photos to Autodesk's servers and receives a triangulated model of the object with all real dimensions and high quality textures. The data obtained was subsequently imported for further processing into another program of this family, the Autodesk Inventor package. The Autodesk Inventor package has a user-friendly interface and a large set of tools for modeling engineering products. To demonstrate the scale and level of sophistication of ReCap Photo, we demonstrate the options included in the application: first of all, the application supports almost all laser scan file formats. In addition, point clouds can be edited arbitrarily - deleted, copied, highlighted, or even added survey points. As a result, it is possible not only to create technical documentation, but also to reconstruct objects with millimeter accuracy. Visualization and design make it possible to eliminate possible errors. It has been demonstrated that such models can be used to design and obtain working documentation. Due to the identity of the spatial virtual model and the real physical object, the accuracy and quality of design is improved. Thus, it is clearly shown that the presented methodology significantly reduces labor intensity and increases efficiency.

Keywords: spatial virtual model, photogrammetry, reverse engineering, ReCap Photo, Autodesk Inventor package

Вступ. Постійно ведеться пошук шляхів скорочення термінів проєктування в машинобудуванні за рахунок автоматизації і комп'ютеризації проєктних робіт, серед яких є напрямком створення віртуальних тривимірних моделей за допомогою лазерного сканування реального об'єкта або за допомогою цифрової камери і подальшого цифрового відтворення цього об'єкта в цифровому просторі та автоматизація розробки технічної документації.

На основі отриманих даних відтворюються фотореалістичні візуалізації, що спрощує взаємодію під час конструювання (CAD), на виробництві (CAM) і проєктуванні на комп'ютері (CAE). На основі відтвореного об'єкта в цифровому просторі можна проєктувати (реверс-інжиніринг) та отримувати робочу документацію. Завдяки ідентичності віртуальних тривимірних моделей і реальних об'єктів, точність і якість проєктування підвищується. Отже, важливість задач числової обробки, передачі зображень, створення віртуальних тривимірних моделей, а також подання результатів обчислення важко переоцінити.

Останнім часом лазерні сканери знайшли застосування в різних галузях для просторового сканування об'єктів, що вимагають точних вимірювань.

Перевага лазерного сканера полягає в тому, що він створює точне зображення об'єктів за рахунок тривимірних позиціонованих хмар окремих точок. Це дає змогу відтворити об'єкт у вигляді віртуальної моделі. При цьому широке використання лазерних сканерів та програмного забезпечення для них дуже обмежене через їхню дорожнечу. Тому необхідно шукати більш дешеві, доступні та не менш точні методи, які легко застосувати на практиці.

Програмне забезпечення ReCap Photo [1] – спеціалізований інструмент настільних і хмарних рішень, призначених для створення тривимірної моделі за даними лазерного сканування або фотографіями. З його допомогою користувач може завантажити на сервери Autodesk результат сканування або комплект фотографій і отримати в результаті 3D-модель об'єкта з текстурами високої якості. Щоб оцінити масштаб і рівень опрацювання, досить поглянути на закладені в нього опції: насамперед, додаток підтримує майже всі формати файлів. Хмари точок, крім цього, можна редагувати довільно – видаляти їх, копіювати, підсвічувати або додавати точки обстеження. При цьому отримані дані згодом можуть бути імпортовані в інші програми сімейства Autodesk. Це

значно розширює можливості в тому плані, що виходить не тільки високоякісна візуалізація отриманих даних, але також можна імпортувати їх в інші продукти Autodesk для спільної обробки. В результаті користувач отримує можливість не тільки створювати технічну документацію, але також проводити реконструкції або удосконалення робочих об'єктів з точністю до міліметра. Отримані 3D-моделі можна використовувати в програмах для проєктування. На основі таких моделей можна проєктувати й отримувати робочу документацію [2]. Завдяки ідентичності 3D-моделі та реального об'єкта точність і якість проєктування підвищується.

Мета та постановка завдання – з'ясувати можливості використання цифрової фотограмметрії [3–5], як одного з сучасних методів реверс-інжинірингу, та пакету Autodesk Inventor [6–8] (використовуючи набір інструментів середовища автоматизованого проєктування) для можливості вивчення: кількісних та якісних характеристик об'єктів; етапів відтворення об'єктів у вигляді віртуальних моделей; етапів опрацювання зображень цих об'єктів.

Зворотне проєктування. Можливість вдосконалювати машинобудівні вироби та створювати нові

на основі вже існуючих аналізувалась на прикладі реальної фізичної деталі (елементу зубчастої передачі) [9].

Для формування об'ємної моделі робимо серію знімків, кружляючи навколо реального фізичного об'єкта. Рекомендується робити знімки після кожного невеликого переміщення і в місці з постійним освітленням і відсутністю тіней. При цьому на задньому плані не повинно бути рухомих об'єктів. Під час фотозйомки необхідно зберігати перпендикулярне положення щодо об'єкта. Потрібно змінювати висоту під час кожного кругового проходу, поки не захопиться вся поверхня об'єкта. Фотографії мають бути чіткими і без відблисків.

При відкритті ReCap Foto з'являється панель інструментів (рис. 1). Для створення 3D-проєкту, на панелі інструментів, у розділі «Create 3D» необхідно вибрати інструмент «Object». Після цього необхідно ви брати і завантажити фотографії (рис. 2), які будуть використовуватися для створення 3D-моделі. При цьому можна вибрати режим автоматичної обрізки для видалення більшої частини фону. У цій роботі цей режим відключено для глибшого показу можливостей «Вікна редагування» ReCap Foto.

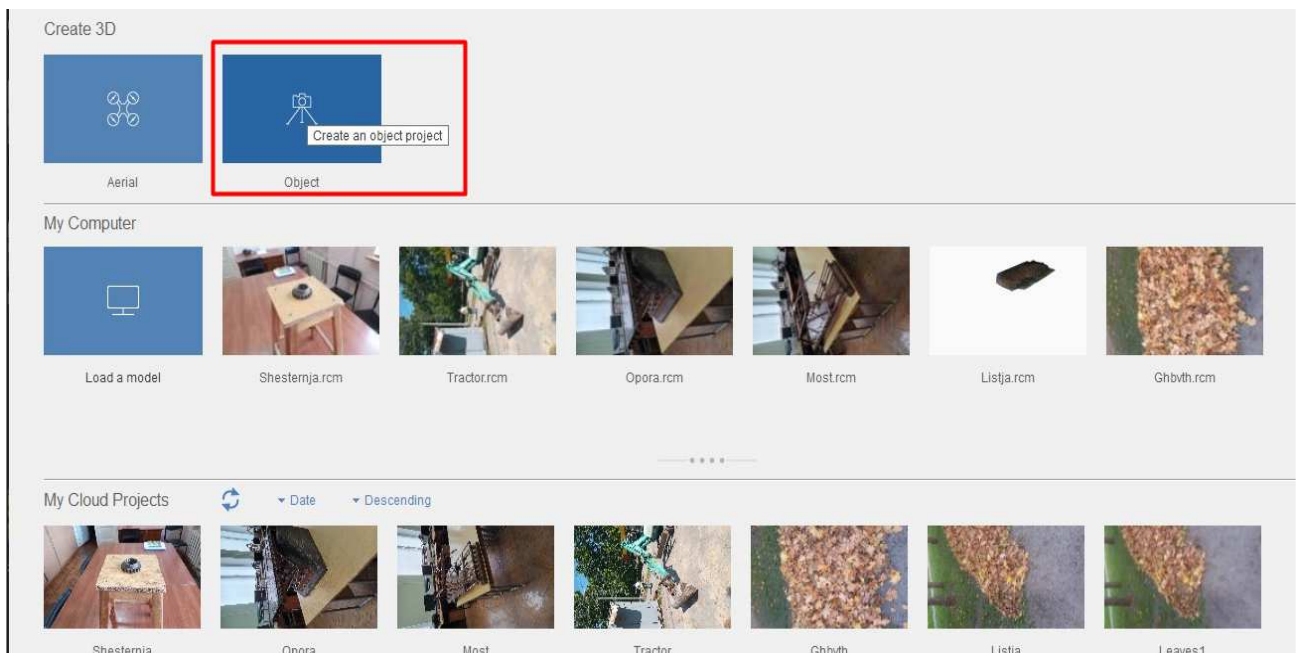


Рисунок 1 – ReCap Foto: панель інструментів

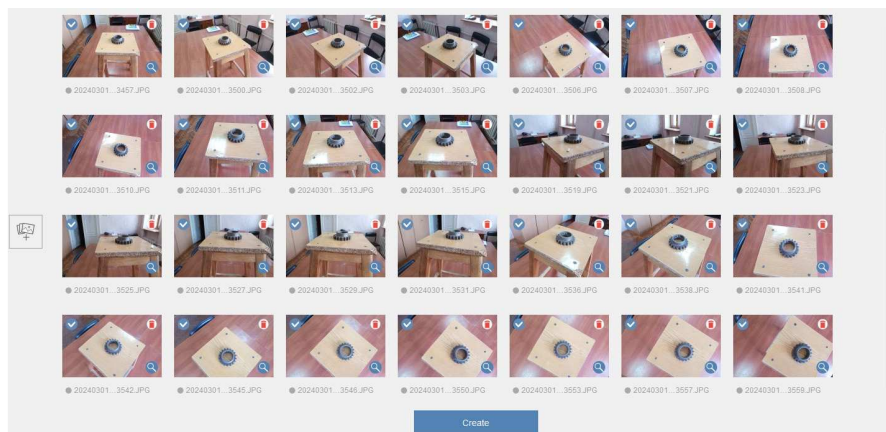


Рисунок 2 – ReCap Foto: завантаження фотографій

Після об'єднання, обчислення та обробки фотографій ReCap Foto перетворить на 3D-модель, яка з'явиться на панелі інструментів у розділі «My Cloud Drive». Інструмент «Open mesh» завантажує 3D-модель із хмари. Після збереження 3D-моделі у розділі «My Computer» вибираємо 3D-модель для редагування, завантажуючи у вікно редактора.

У цьому вікні присутні інструменти, що дають змогу «очистити» і виправити дефекти 3D-моделі, отриманої у вигляді полігонної мережі (рис. 3, а). Це текстуровані вихідні дані для редагування. Як видно, разом із 3D-моделлю шестерні оброблено багато непотрібної інформації (сміття). Застосовуючи інструменти редагування, рекомендується видалити все зайве (рис. 3, б–г) для зменшення розміру експортованих результатів у вигляді файлу для реверс-інжинірингу в пакеті Autodesk Inventor.



Рисунок 3 – «Очищення» 3D-моделі

За допомогою спеціальних інструментів можна робити заміри, немов вимірюємо реальну деталь. За допомогою інструмента «Set scale & units» можна

масштабувати модель, достатньо знати один реальний розмір деталі або будь-якого елемента деталі (рис. 4).

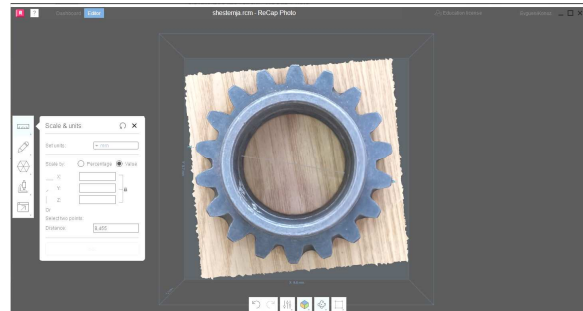
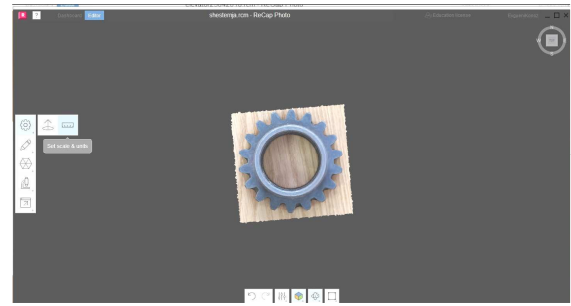


Рисунок 4 – Масштабування 3D-моделі

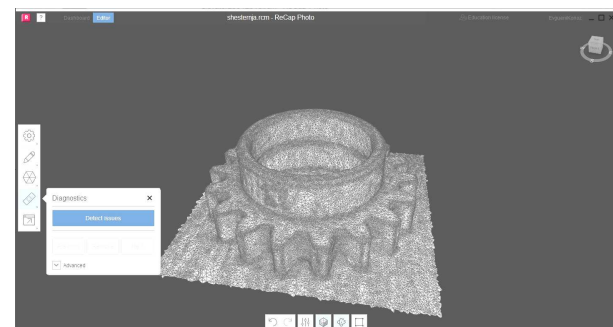


Рисунок 5 – Редагування 3D-моделі

Для діагностики та виправлення дефектів 3D-моделі можна скористатися інструментом «Detect and fix model issues» (рис. 5).

Інструмент «Transform model» дає змогу змінити положення 3D-моделі в просторі (рис. 6).

Скориставшись інструментом зрізу з активованою функцією заливки «Slice & fill», видаляємо зайву частину із заповненням нижньої частини 3D-моделі (рис. 7). Результати роботи можна експортувати в растрове зображення, відео або формати моделей: obj, fbx, 3dm, stl, ply, pts (рис. 8, а).

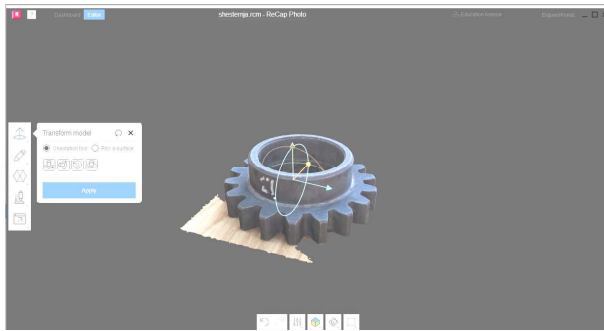


Рисунок 6 – Трансформація 3D-моделі у просторі

Отриману 3D-модель надалі можна використувати для конструювання (CAD), виробництва

(CAM) і проектування на комп'ютері (CAE).

Для відтворення 3D-моделі у вигляді віртуальної моделі в пакеті Autodesk Inventor за наявності фізичної шестірні, експортуємо та зберігаємо результат у форматі .obj (рис. 8, б).

Завантажуючи збережений файл у пакет Autodesk Inventor, отримуємо лише сітку (рис. 9, а). Для перетворення в базовий об'єкт у дереві побудов вибираємо завантажений об'єкт і задаємо з контекстного меню «Convert to Base Feature» (рис. 9, б, в). На рис. 9, г показано результат перетворення в твердотільну модель. Для більшої наочності зображено $\frac{3}{4}$ віртуальної моделі шестерні (рис. 9, з).

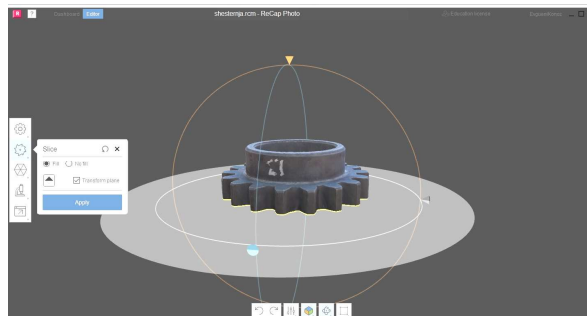
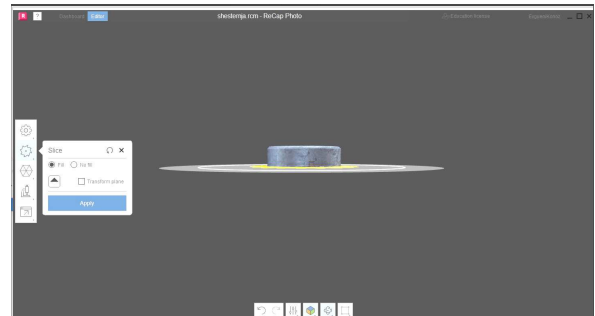
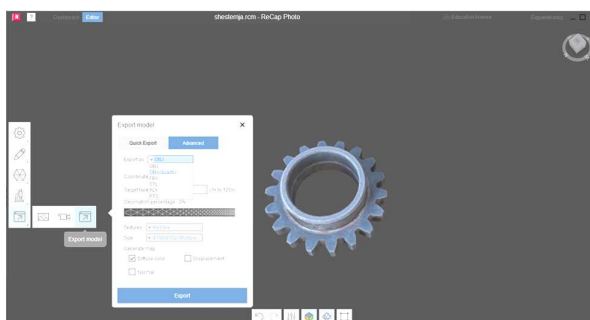
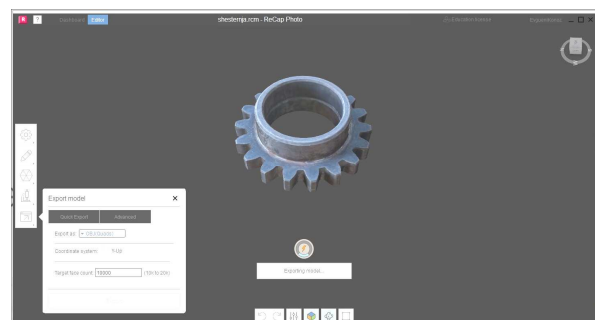


Рисунок 7 – Наповнення 3D-моделі



а



б

Рисунок 8 – Експорт 3D-моделі

Деякі можливості зворотного проектування [10] на прикладі використання фізичної деталі шестерні та пакета Autodesk Inventor наведені на рис. 9, д.

Висновки. Реверс-інжиніринг є потужним інструментом у машинобудівній галузі та дає можливість вдосконалювати вироби та створювати нові на основі вже існуючих.

Використання програмного забезпечення компанії Autodesk зі спеціалізованими інструментами

підтримує процес реверс-інжинірингу.

Використання програмного забезпечення (пакету Autodesk Inventor) при створенні точної копії об'єкта за вже наявним виробом здебільшого вимагає або ручного постоброблення файлу, або повного окреслення поверхні (поверхонь) виробу.

Реверс-інжиніринг доцільно використовувати для аналізу та вдосконалення дизайну та технічних характеристик виробів, що є важливим для забезпе-

чення їх надійності та безпечного використання.

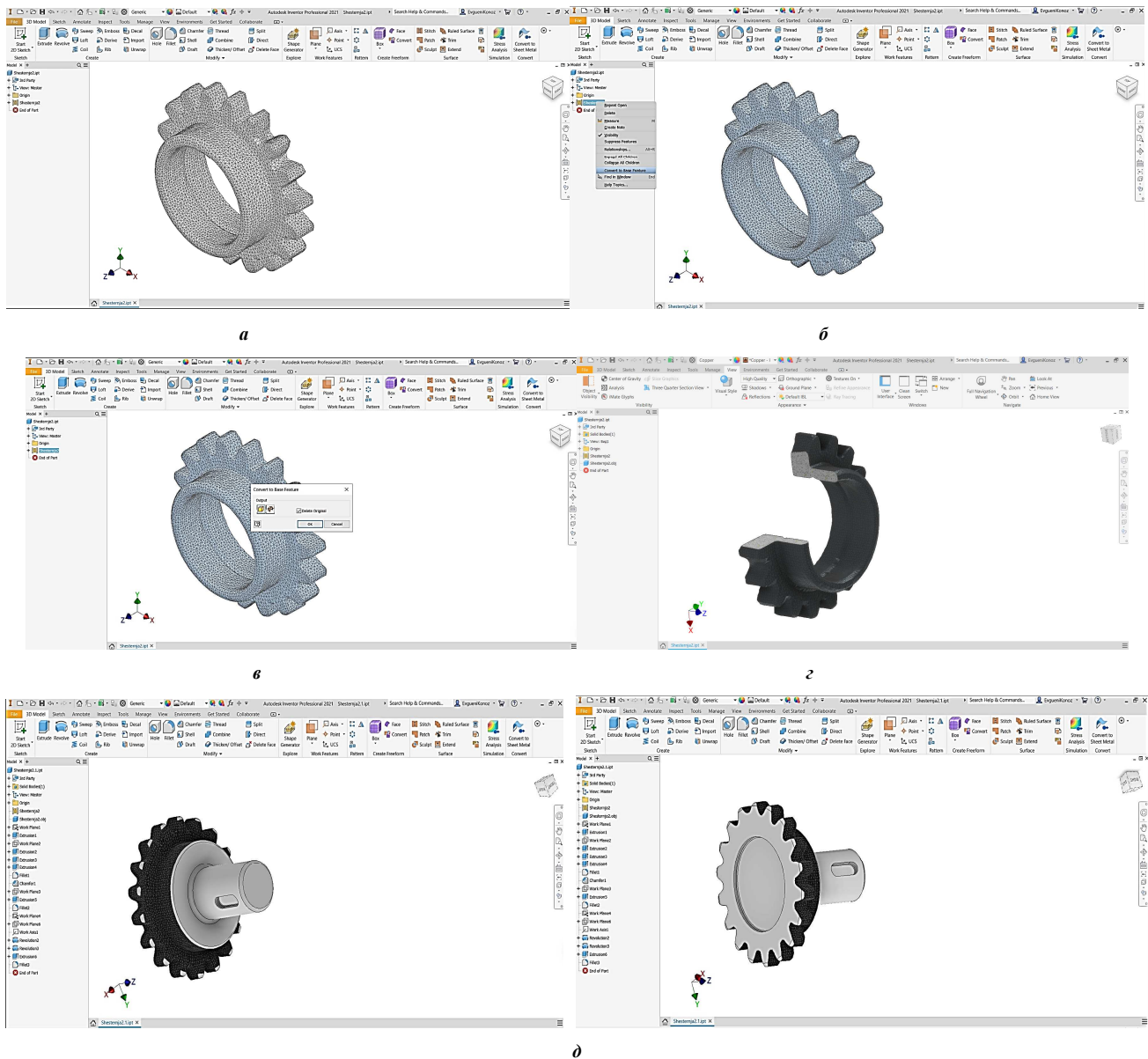


Рисунок 9 – Зворотнє проектування в пакеті Autodesk Inventor:

а – модель у форматі obj; б – Convert to Base Feature; в – Solid; г – $\frac{3}{4}$ віртуальної моделі; д – редагування моделі

Фотограметрія, як один з методів не потребує дорогого обладнання, можна використовувати звичайний телефон для фотографування об'єкта. Попри меншу точність, цей метод більш доступний і може бути використаний в машинобудівній галузі та у навчальному процесі.

При цьому підвищується ефективність застосування під час навчальної підготовки студентів при відсутності лазерних сканерів. Також метод дозволяє отримати практичні навички побудови віртуальних просторових моделей деталей, вдосконалювати машинобудівні виробни та створювати нові на основі реальних фізичних об'єктів з високим ступенем точності та отримати практичні навички при підготовці спеціалістів машинобудівної галузі.

Список літератури

1. Ліцензійне програмне забезпечення Autodesk ReCap Pro: <https://bimpartner.com.ua/recap-pro/>
2. Ванін В.В. *Оформлення конструкторської документації: навч. посіб.* / В. В. Ванін, А. В. Блюк, Г. О. Гнітецька. К.: Каравела, 2018. 200 с.
3. Дорожинський О.Л. *Фотограметрія: Підручник* / О.Л. Дорожинський, Р. Тукай. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2008. 332 с.
4. Дорожинський О.Л. *Фотограметрія та дистанційне зондування: підручник*; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. Кн.1.176 с:іл
5. Пеньков В. О. *Фотограметрія: конспект лекцій для бакалаврів спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій* / В. О. Пеньков; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 100 с.
6. *Autodesk Inventor 2022 Basics Tutorial: Sketching, Part Modeling, Assemblies, Drawing, Sheet Metal, Model-Based Dimensioning, and Frame Generator Paperback*. Independently published, 2021. 235 p.
7. Banach Daniel T. *Autodesk Inventor 2022 Essentials Plus*

- / Daniel T. Banach, Travis Jones, Shawna Lockhart. New York. 2021. 550 p.
8. Scott Hansen. *Autodesk Inventor 2022: A Tutorial Introduction*. SDC Publications, 2021. 490 p.
 9. ДСТУ ISO 1122-1:2006 *Передачі зубчасті. Словник термінів. Частина 1. Визначення, що стосуються геометрії* (ISO 1122-1:1998, IDT).
 10. Cyganek, B., Siebert J. (2009). An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms. *John Wiley & Sons*, pp. 59-60, 194-196.

References (transliterated)

1. *Licenzijne programme zabezpechennya Autodesk ReCap Pro*: <https://bimpartner.com.ua/recap-pro/>
2. Vanin V.V. *Oformlennya konstruktors`koyi dokumentaciyi: navch. posib.* / V. V. Vanin, A. V. Bliok, G. O. Gnitez`ka. K.: Karavela, 2018. 200 p.
3. Dorozhy`ns`ky`j O.L. *Fotogrammetriya: Pidruchny`k* / O.L. Dorozhy`ns`ky`j, R. Tukaj. L`viv: Vy`d-vo L`viv. politexniky`, 2008. 332 p.
4. Dorozhy`ns`ky`j O.L. *Fotogrammetriya ta dy`stancijne zonduvannya: pidruchny`k* / O. L. Dorozhy`ns`ky`j; M-vo osvity` i na-uky` Ukrainy`, Nacz. un-t «L`viv. politexnika». L`viv: Vy`d-vo L`viv. politexniky`, 2019. Kn. 1. 176 p.: il.
5. Pen`kov V. O. *Fotogrammetriya: konspekt lekcij dlya bakalavriv special`nosti 193 – Geodeziya ta zemleustrij* / V. O. Pe-n`kov; Xarkiv. nacz. un-t mis`k. gosp-va im. O. M. Beketova. Kharkiv : XNUMG im. O. M. Beketova, 2019. 100 p.
6. *Autodesk Inventor 2022 Basics Tutorial: Sketching, Part Modeling, Assemblies, Drawing, Sheet Metal, Model-Based Dimensioning, and Frame Generator Paperback*. Independently published, 2021. 235 p.
7. Banach Daniel T. *Autodesk Inventor 2022 Essentials Plus / Daniel T. Banach, Travis Jones, Shawna Lockhart*. New York. 2021. 550 p.
8. Scott Hansen. *Autodesk Inventor 2022: A Tutorial Introduction*. SDC Publications, 2021. 490 p.
9. DSTU ISO 1122-1:2006 *Peredachi zubchasti. Slovny`k terminiv. Chasty`na 1. Vy`znachennya, shho stosuyut`sya geometriyi* (ISO 1122-1:1998, IDT)
10. Cyganek, B., Siebert J. (2009). An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms. *John Wiley & Sons*, pp. 59-60, 194-196.

Надійшла (received) 30.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Іванов Євген Мартинович / Ivanov Evgen – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри комп'ютерної графіки; м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-9011-7269>; e-mail: repositiv@gmail.com