

УДК 004.9:621.7

ФІЛЬ Н. Ю., к.т.н., доцент,  
(Харківський національний автомобільно-дорожній університет),  
ДЕЙНЕКО Ж. В., к.т.н., доцент,  
(Харківський національний університет радіоелектроніки)

## Вибір програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислових об'єктів

У теперішні важкі часи для української економіки актуальним є впровадження технології реверсного інжинірингу. За допомогою 3D-сканування створюється цифрова модель різних об'єктів. Реверс-інжиніринг використовується в різних галузях промисловості. Автоматизація процесу впровадження технології реверсного інжинірингу промислового об'єкта потребує наукового вирішення низки завдань: обґрунтування вибору ефективного методу реверсного інжинірингу; вибору ефективного 3D-сканера з урахуванням особливостей промислового об'єкта; вибору ефективного програмного забезпечення та апаратного забезпечення. Метою роботи є розроблення математичної моделі вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу залежно від багатьох технічних характеристик і витратних показників, що дає змогу скоротити терміни впровадження реверсного інжинірингу та знизити фінансові ризики. Розроблено модель вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта, яка стосується моделей багатокритеріального дискретного програмування. Використання запропонованої моделі вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта дасть змогу скоротити час проєктування технології реверсного інжинірингу, знизити ризики незапланованих витрат на додаткове програмне забезпечення для вирішення всіх завдань реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

**Ключові слова:** реверс-інжиніринг, модель, критерій, програмний засіб, вартість, функціональна повнота, дискретне програмування.

### Вступ

Перед підприємствами України стоїть завдання швидкого відновлення виробництва, що неможливо без забезпечення запасними частинами для зруйнованого обладнання. Виробництво запасних частин для зруйнованого обладнання доцільно виконувати в Україні. Таке виробництво дасть змогу не лише створити нові робочі місця, а й скоротити час для відновлення підприємств. Але для виробництва запасних частин для зруйнованого обладнання потрібна технічна документація не тільки на все устаткування, але на кожну деталь окремо. Отже, у нинішніх важких для української економіки умовах актуальним є впровадження технології реверсного інжинірингу для виробництва промислових об'єктів.

Реверс-інжиніринг – процес розроблення конструкторської документації на основі вихідних даних, отриманих у вигляді готового зразка необхідної деталі. Використання реверс-інжинірингу дає змогу створити за допомогою 3D-сканування цифрову модель САД деталі обладнання. Цей метод використовується в багатьох галузях промисловості, включаючи виробництво військової техніки [1].

Фахівці створюють цифрові моделі запасних частин для обладнання за допомогою 3D-сканування. Створення якісної цифрової моделі можливо лише за умови використання ефективного програмного забезпечення, що дає змогу проєктувати геометрично ідентичний об'єкт.

### Аналіз публікацій

Проблемам використання реверс-інжинірингу різних об'єктів присвячено багато праць вітчизняних і зарубіжних авторів. У роботі [1] розглядаються типи реверсного інжинірингу, використовуваного при відтворенні різних деталей і вузлів, технічних характеристик і технічної документації за наявними зразками виробів. Встановлено, що сумарна вартість проєкту зворотного інжинірингу має бути меншою, ніж залишкова вартість і вартість можливого ремонту.

У роботі [2] визначено, що використання реверсного інжинірингу дає змогу знизити витрати ресурсів для виробництва різних деталей. Зниження собівартості виробництва є актуальним питанням для машинобудівних підприємств України.

У роботах [1, 3, 4] авторами визначена послідовність виконання завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів. На першому етапі проводиться вимірювання реального об'єкта і визначаються параметри об'єкта. Далі використовується спеціальне устаткування – 3D-сканер для сканування об'єкта. За допомогою програмного забезпечення створюється його цифрова модель, що може бути використана не тільки для відтворення об'єкта, а і його дослідження з метою покращення його технічних характеристик.

Українське підприємство Vibus спеціалізується на відновленні конструкторської документації для різних об'єктів на основі 3D-сканування. Для цього використовується спеціальне програмне забезпечення для формування 3D-поверхонь. Отримана конструкторська документація і CAD модель об'єкта дає змогу фахівцю отримати всю необхідну інформацію [5].

Для стандартизованих деталей розроблено алгоритм для реверс-інжинірингу [6]. Автори визначають, що відсутність теоретичних розробок щодо послідовності дій відповідної множини процедур для реверсного інжинірингу призводить до втрат часу та фінансів.

При реверс-інжинірингу існує інваріантна до об'єкта множина процедур, виконувана завжди [7, 8].

Реверс-інжиніринг – технологія, що сьогодні інтенсивно розвивається та широко використовується у всьому світі. Для автоматизації процесу впровадження технології реверс-інжинірингу промислового об'єкта необхідно вирішити такі завдання:

- вибір ефективного 3D-сканера з урахуванням особливостей промислових об'єктів;
- вибір ефективного програмного забезпечення;
- вибір ефективного апаратного забезпечення.

Завдання вибору програмного забезпечення (ПЗ) для вирішення завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів є актуальним науково-прикладним завданням.

### Мета та постановка задачі

Метою є розроблення моделей вибору ПЗ для реверсного інжинірингу промислових об'єктів залежно від багатьох функціональних і вартісних критеріїв, що дасть змогу скоротити час і фінансові втрати під час впровадження проекту реверс-інжинірингу промислових об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути характеристики ПЗ, використовуваного для завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів; вибрати і провести аналіз критеріїв, які впливають на вибір програмного забезпечення.

При розробленні цифрової моделі промислового

об'єкта можливе використання різного програмного забезпечення, ефективно застосовуваного для вирішення різних завдань.

Наприклад, програмні системи ICEM surf, Imageware UG, ProEngineer, Solidworks використовуються для отримання CAD-моделей і триангуляційних моделей на основі системи точок, отриманих при скануванні об'єкта [5].

ПЗ Magics RP, DeskArtes, Catia Shape Sculptor та Viscam RP використовуються для редагування, модифікації та оптимізації 3D триангуляційної моделі [5].

Повний набір інструментів обробки даних для реверс-інжинірингу забезпечує таке ПЗ: GSI Studio, CopyCAD, Rapidform, Gcomagics, Polyworks (Modeler) і Paraform [5].

Для поверхневого моделювання та редагування CAD-моделей або елементів при виконанні реверсного інжинірингу можна використовувати таке ПЗ: PowerSHAPE, ProEngineer, UG, Solidworks, Catia та Rhino [5].

Для виконання 3D-контролю, створення та аналізу карти похибок і ведення документації для реверсного інжинірингу використовується ПЗ COMETinspect, Metris Focus Inspection, PowerINSPECT, PolyWorks Inspector та Geomagic Qualify [5].

Сьогодні на ринку ПЗ існує багато різних систем, які можуть використовуватися для вирішення завдань реверсного інжинірингу промислових об'єктів. Відсутність чітких рекомендацій щодо вибору ПЗ не дає змогу зробити цей вибір науково обґрунтованим з урахуванням особливостей конкретних промислових об'єктів.

### Модель вибору програмного забезпечення

Розглянемо модель вибору ПЗ для реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

При виконанні реверсного інжинірингу промислового об'єкта необхідно виконати множину операцій  $R = \{R_j\}$ . ( $j = \overline{1, j'}$ ), де  $j'$  – кількість операцій, які необхідно виконати для реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

Кожна операція реверсного інжинірингу може бути виконана множиною різних ПЗ  $Z_j = \{Z_j^\gamma\}$ , ( $j = \overline{1, j'}$ ;  $\gamma = \overline{1, \gamma^j}$ ), де  $\gamma^j$  – кількість ПЗ, які можуть бути використані для виконання  $j$ -ї операції реверсного інжинірингу.

Введемо змінну  $X_j^\gamma = \{0;1\}$ , де  $X_j^\gamma = 1$ , якщо обраний  $\gamma \in$  ПЗ для реалізації  $j$ -ї множини операцій реверсного інжинірингу промислового об'єкта, у протилежному випадку  $X_j^\gamma = 0$ , ( $j = \overline{1, j'}$ ;  $\gamma = \overline{1, \gamma^j}$ ).

Введемо коефіцієнт  $Y_j^\gamma = \{0;1\}$ , де  $Y_j^\gamma = 1$ , якщо

$\gamma$ -м ПЗ забезпечено  $j$ -ту множину операцій реверсного інжинірингу промислового об'єкта, у протилежному випадку  $Y_j^\gamma = 0, (j = \overline{1, j'}; \gamma = \overline{1, \gamma'})$ .

ПЗ має функціональні, технічні, інтеграційні та вартісні характеристики.

Функціональними характеристиками  $\gamma$ -го ПЗ є його функціональна повнота ПЗ  $P_\gamma$  і наявність інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу ПЗ  $F_\gamma (\gamma = \overline{1, \gamma'})$ .

Технічними характеристиками  $\gamma$ -го ПЗ є необхідний об'єм оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП)  $V_\gamma^{\text{ОЗП}}$  і необхідний об'єм постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП)  $V_\gamma^{\text{ПЗП}} (\gamma = \overline{1, \gamma'})$ .

Інтеграційною характеристикою  $\gamma$ -го ПЗ є показник, що визначає сумісність  $k$ -го ПЗ із  $\gamma$ -м ПЗ у вигляді коефіцієнта  $S_{\gamma k} = \{0, 1\}$ , де  $S_{\gamma k} = 1$ , якщо  $\gamma$ -й ПЗ сумісно з  $k$ -м ПЗ, у протилежному випадку  $S_{\gamma k} = 0, (k, \gamma = \overline{1, \gamma'})$ .

Також інтеграційною характеристикою  $\gamma$ -го ПЗ є показник, що визначає взаємозамінність  $\gamma$ -го ПЗ на  $k$ -й ПЗ у вигляді коефіцієнта  $B_{\gamma k} = \{0, 1\}$ , де  $B_{\gamma k} = 1$ , якщо  $\gamma$ -й ПЗ можна замінити  $k$ -м ПЗ, у протилежному випадку  $B_{\gamma k} = 0, (k, \gamma = \overline{1, \gamma'})$ .

Вартісними характеристиками  $\gamma$ -го ПЗ є його вартість  $C_\gamma$  і вартість технічного супроводження та обслуговування  $C_\gamma^{\text{TC}}, (\gamma = \overline{1, \gamma'})$ .

Модель вибору програмного забезпечення має такий вигляд.

Часткові критерії оптимізації:

– максимальна функціональна повнота

$$P = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} P_\gamma X_j^\gamma \rightarrow \max; \quad (1)$$

– мінімальна вартість технічного супроводження та обслуговування на  $\gamma$ -му ПЗ

$$C^{\text{TC}} = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} C_\gamma^{\text{TC}} X_j^\gamma \rightarrow \min; \quad (2)$$

– мінімальна вартість  $\gamma$ -го ПЗ

$$C = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} C_\gamma X_j^\gamma \rightarrow \min; \quad (3)$$

– мінімальний об'єм ОЗП

$$V^{\text{ОЗП}} = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} V_\gamma^{\text{ОЗП}} X_j^\gamma \rightarrow \min; \quad (4)$$

– мінімальний об'єм ПЗП

$$V^{\text{ПЗП}} = \sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} V_\gamma^{\text{ПЗП}} X_j^\gamma \rightarrow \min. \quad (5)$$

Область допустимих рішень визначається обмеженнями:

– усі операції мають бути забезпечені обраним ПЗ

$$\sum_{\gamma=1}^{\gamma'} Y_j^\gamma X_j^\gamma \geq 1, \exists j = \overline{1, j'}; \quad (6)$$

– вартість технічного супроводження та обслуговування ПЗ не має перевищувати заданих  $C_{\text{зад}}^{\text{TC}}$

$$\sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} C_\gamma^{\text{TC}} X_j^\gamma \leq C_{\text{зад}}^{\text{TC}}; \quad (7)$$

– з підмножини  $M_B$  взаємозамінних ПЗ має бути обрано лише один ПЗ

$$\sum_{\gamma \in M_B} B_{\gamma \tilde{\gamma}} X_j^\gamma = 1, \gamma = \overline{1, \gamma'}; \forall B_{\gamma \tilde{\gamma}} = 1; j = \overline{1, j'}; \exists \gamma = \overline{1, \gamma'} \quad (8)$$

– усі обрані ПЗ мають бути сумісними

$$B_{\gamma \tilde{\gamma}} X_j^\gamma X_j^{\tilde{\gamma}} = 1; \tilde{\gamma} = \overline{1, \gamma-1}; \tilde{\gamma} = \overline{\tilde{\gamma}+1, \gamma'}; \forall B_{\gamma \tilde{\gamma}} = 1; \quad (9)$$

– необхідний об'єм ПЗП не має бути більше заданого  $V_{\text{зад}}^{\text{ПЗП}}$

$$\sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} V_\gamma^{\text{ПЗП}} X_j^\gamma \leq V_{\text{зад}}^{\text{ПЗП}}; \quad (10)$$

– необхідний об'єм ОЗП не має бути більше заданого  $V_{\text{зад}}^{\text{ОЗП}}$

$$\sum_{j=1}^{j'} \sum_{\gamma=1}^{\gamma'} V_\gamma^{\text{ОЗП}} X_j^\gamma \leq V_{\text{зад}}^{\text{ОЗП}}, \quad (11)$$

де  $V_{\text{зад}}^{\text{ОЗП}}$  – об'єм ОЗП, необхідний для забезпечення надійної роботи найбільш вимогливого ПЗ.

Наведена математична модель (1)-(11) належить до задач багатокритеріального дискретного програмування та, на відміну від відомих, ураховує системні вимоги до програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта в цілому.

Результати вирішення завдання вибору ПЗ є вихідними даними для завдання вибору апаратного забезпечення реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

### Висновки

У роботі розглянуто основні завдання реверсного інжинірингу промислового об'єкта. Визначено, що автоматизація процесу впровадження технології реверс-інжинірингу промислового об'єкта потребує наукового підходу.

Розроблено модель вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта, що належить до класу моделей багатокритеріального дискретного програмування та, на відміну від відомих, ураховує системні вимоги до програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта в цілому.

У подальшому планується розробити систему підтримки прийняття рішення щодо вибору програмного забезпечення для реверсного інжинірингу промислового об'єкта.

### Список використаних джерел

1. Іванов В. В. Моделі проекту зворотного інжинірингу. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 2 (1224). С. 52–57.
2. Зворотній інжиніринг і створення 3D-моделі / І. В. Пихтєєва, О. В. Івженко, Г. В. Антонова, С. І. Малюта. *Науковий вісник ТДАТУ*. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, Т. 2. № 35.
3. Білинський Й. Й., Животівський С. М. Огляд методів 3d-контролю геометричних розмірів деталей. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2022. Вип. 2. С. 114–22. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-114-122>.
4. Современное оборудование и программное обеспечение обратного инжиниринга промышленных изделий / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, С. И. Чернышов, Я. Н. Гаращенко. *Збірник наукових праць НТУ «ХПІ»: Сучасні технології в машинобудуванні*. 2010. № 5, С. 138–152.
5. ТОВ з П «БІБУС Україна». URL: <http://bibus.com.ua>. (дата звернення: 24.04.2023).
6. Іванов В. В., Чумак Н. В. Метрологічні аспекти зворотного інжинірингу стандартизованих виробів.

*Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2017. № 7 (1229). С. 137–141. doi:10.20998/2413-4295.2017.07.19.

7. Brandyberry A. Determinants of adoption for organizational innovations approaching saturation. *European journal of innovation management*. 2003. Vol. 6, Is. 3. P. 150–158. doi: 10.1108/14601060310486226.
8. Lopez-Herrejon R. E., Linsbauer L., Galindo J. A., Parejo J. A., Benavides D., Segura S., Egyed A. An assessment of search-based techniques for reverse engineering feature models. *Journal of systems and software*. 2015. № 103. P. 353–369. doi: 10.1016/j.jss.2014.10.037.

### Fil N. Yu., Deineko Z.V. The challenge of choosing a software tool for reverse engineering of industrial products.

**Abstract.** *In the current difficult times for the Ukrainian economy, the introduction of reverse engineering technology is relevant. 3D scanning is used to create a digital model of various objects. Reverse engineering is used in various industries. Automation of the process of introducing reverse engineering technology of an industrial object requires a scientific solution to a number of problems: justification for choosing an effective reverse engineering method, the choice of effective 3D scanner, taking into account the characteristics of the industrial object, the choice of effective software and hardware. The aim is to develop a mathematical model for selecting software for reverse engineering, depending on a variety of technical characteristics and costs, which can reduce the time of implementation of reverse engineering and reduce financial risks. A software selection model for reverse engineering of an industrial facility, which refers to multi-criteria discrete programming models, is developed. The use of the proposed software selection model for reverse engineering of an industrial facility will reduce the design time of reverse engineering technology, reduce the risks of unplanned costs of additional software for all reverse engineering tasks of an industrial facility.*

**Keywords:** *reverse engineering, model, criterion, software tool, cost, functional completeness, discrete programming.*

Надійшла 01.05.2023 р.

**Філь Наталія Юрївна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [fnu@khadi.kharkov.ua](mailto:fnu@khadi.kharkov.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2081-7176>.

**Дейнеко Жанна Валентинівна**, кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри медіасистем та

технологій, Харківський національний університет  
радіоелектроніки, Харків, Україна,  
[zhanna.deineko@nure.ua](mailto:zhanna.deineko@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>.

**Fil Nataliia Yuriivna**, candidate of technical sciences,  
Associate professor of the Department of Automation and  
Computer-Integrated Technologies, Kharkiv National  
Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,  
[fnu@khadi.kharkov.ua](mailto:fnu@khadi.kharkov.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2081-7176>.

**Deineko Zhanna Valentynivna**, candidate of technical  
sciences, Head of the Department of Media Systems and  
Technologies, Kharkiv National University of Radio  
Electronics, Kharkiv, Ukraine, [zhanna.deineko@nure.ua](mailto:zhanna.deineko@nure.ua),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0175-4181>.