

I. Е. ЯКОВЕНКО, О. А. ПЕРМЯКОВ, Д. Г. МУЗИЧКА, В. І. ГОРБУЛИК

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ РЕВЕРСИВНОГО ІНЖИНІРИНГУ В МАШИНОБУДІВНІЙ ГАЛУЗІ

Анотація. Досліджено стан, динаміку та тенденції підприємств, що займаються наданням послуг у галузі технічного обслуговування, ремонту та відновлення машин. Визначено характер та особливості відмов, що призводять до втрати здатності машини виконувати своє функціональне призначення. Виділено три основні методи організації ремонтних робіт, які визначають принципи організації підприємства з ремонту та технічного обслуговування. В рамках дослідження розглянуто особливості розвитку сфери технічного обслуговування та ремонту у різних економічних регіонах, у тому числі України. У ході дослідження було проаналізовано статистичні дані функціонування підприємств технічного обслуговування та ремонту за останні 10-12 років, виявлено основні закономірності їх зміни, визначено основні фактори, що вплинули на цей процес. Встановлено, що основна частка виконуваних робіт припадає на промислове обладнання, транспортні засоби, будівельну та сільськогосподарську техніку. Причому спостерігається стабільне зростання затребуваності послуг, пов'язаних із обслуговуванням та відновленням обладнання (у середньому від 2% до 7,5% на рік, залежно від економічного розвитку країни). Особливу увагу приділено тенденціям у галузі реверсивного інжинірингу, що становить до 20% усіх ремонтних робіт. При цьому відновлення деталей найчастіше здійснюється за відсутності з різних причин конструкторсько-технологічної документації необхідної для її виготовлення, що потребує певної оснащеності та спеціалізації підприємства. Виділено основні фактори, які визначають постійно зростаючу потребу у такому вигляді послуг. Наголошено, що розвиток сучасних комп'ютерних технологій та засобів вимірювань відкривають нові можливості для розвитку підприємств, які займаються реверсивним інжинірингом.

Ключові слова: відмова обладнання; ремонт; відновлення; 3D моделювання; адитивна обробка; субтрактивна обробка; цифровізація

I. YAKOVENKO, O. PERMYAKOV, D. MUZYCHKA, V. GORBULYK

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF REVERSE ENGINEERING IN THE MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY

Abstract. The state, dynamics and trends of enterprises engaged in the provision of services in the field of technical maintenance, repair and restoration of machines have been studied. The nature and features of failures that lead to the loss of the machine's ability to perform its functional purpose have been determined. Three main methods of organizing repair work have been identified, which define the principles of organizing a repair and maintenance enterprise. The study examined the characteristics of technical maintenance and repair development in various economic regions, including Ukraine. During the study, statistical data on the functioning of technical maintenance and repair enterprises over the past 10-12 years were analyzed, the main patterns of their change were identified, and the main factors that influenced this process were identified. It was established that the main share of the work performed falls on industrial equipment, vehicles, construction and agricultural machinery. Moreover, there is a stable growth in the demand for services related to the maintenance and restoration of equipment (on average from 2% to 7.5% per year, depending on the economic development of the country). Particular attention is paid to trends in the field of reverse engineering, which accounts for up to 20% of all repair work. At the same time, the restoration of parts is most often carried out in the absence, for various reasons, of the design and technological documentation necessary for their manufacture, which requires a certain level of equipment and specialization of the enterprise. The main factors that determine the constantly growing need for this type of service are highlighted. It is emphasized that the development of modern computer technologies and measuring instruments opens up new opportunities for the development of enterprises engaged in reverse engineering.

Keywords: equipment failure; repair; restoration; 3D modeling; additive manufacturing; subtractive manufacturing; digitalization

Вступ

Необхідність ремонту та обслуговування з'явилася у житті людей одночасно з виникненням машин та буде затребувана протягом усього життєвого циклу як людини, так і обладнання. Така необхідність впливає безпосередньо з визначення машини. Машина - технічний пристрій, що виконує механічні рухи для перетворення енергії, матеріалів та інформації. Більш сучасне визначення свідчить «Машиною є технічний об'єкт, що з взаємопов'язаних функціональних елементів (деталей, вузлів, пристроїв, механізмів та інших.), використовує енергію до виконання покладених на нею функцій» [1]. У цій роботі розглядаються питання, пов'язані з обслуговуванням, ремонтом, відновленням та модернізацією певного класу машин, а саме, енергетичних та робочих машин, тобто тих машин, які мають у своєму складі рухливі елементи. Будь-які деталі, елементи, вузли в процесі свого переміщення один щодо одного схильні до зносу, поломки, що призводить до порушення працездатності машини, і виникає необхідність ремонту для відновлення функціонального її призначення.

Таким чином, будь-яка машина вимагає комплекс операцій для підтримки справного стану або працездатності об'єкта при застосуванні його за призначенням, зберігання і транспортування (технічне обслуговування) і комплекс операцій з відновлення справного стану або працездатності об'єкта і відновлення його ресурсу або його складових (ремонт) [2].

Як показав аналіз основні причини відмови та незапланованих простоїв обладнання виникають при експлуатації обладнання та при його неналежному обслуговуванні (сумарно до 65%) [3] (рис.1).

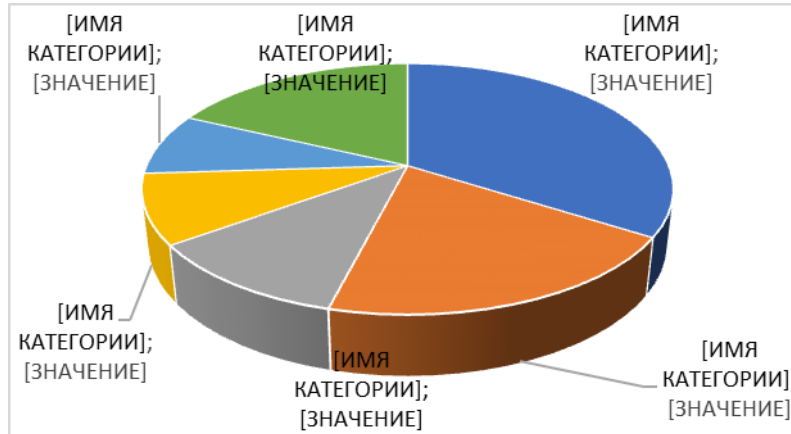


Рис. 1 – Типи відмов обладнання

Все це потребує ремонтно-відновлювальних робіт. Завдяки науковим досягненням концепції «Індустрії 4.0» у галузі сканування, цифровізації інформації та моделювання різних об'єктів машинобудування поряд із традиційними методами ремонту швидко розвивається так званий реверсивний інжиніринг (зворотне проектування, reverse engineering). Загальні концепції реверсивного інжинірингу з урахуванням CAD систем були закладені в [4]. Далі ці положення були розвинені в [5] з урахуванням досягнень в області комп'ютерної техніки та інформаційних технологій того часу. Ця робота послужила основою багатьом публікаціям присвяченим різним аспектам реверсивного інжинірингу від огляду характеристик обладнання для сканування об'єктів та програмних систем зі створення тривимірних моделей до розробки загальної концепції процесу реверсивного інжинірингу для різних галузей [6].

Автори вважають необхідним статистично підтвердити інтуїтивне розуміння значної ролі реверсивного інжинірингу в сучасних умовах, а також оцінити тенденції та перспективи розвитку цього напрямку у машинобудівній галузі України.

Мета дослідження.

Метою даної роботи є комплексне дослідження існуючих та прогнозування майбутніх тенденцій машинобудівних підприємств, які орієнтовані на технічні обслуговування, ремонт та експлуатацію (MRO - Maintenance, Repair, Operations - за міжнародною класифікацією) машин та обладнання, а також тенденції використання реверсивного інжинірингу щодо впровадження у виробничий процес технологічних інновацій та набуття цими підприємствами конкурентних переваг в умовах концепції «Індустрія 4.0».

Постановка завдання.

Для досягнення поставленої меті необхідно вирішити такі завдання :

- проаналізувати статистичні дані обсягу робіт машинобудівних підприємств, які виконують функції MRO у світі, Європі та Україні протягом останніх 10-12 років;
- встановити частку робіт з реверсивного інжинірингу у загальному обсязі робіт пов'язаних з MRO;
- встановити основні закономірності змін та встановити основні фактори, що впливають на зміну статистичних показників ;
- запропонувати рекомендації щодо зниження негативу факторів, які впливають на розвиток таких підприємств;
- запропонувати рекомендації щодо впровадження сучасних техніко - технологічних інновацій та інших складових концепції Індустрії 4.0 у процеси створення та підтримки працездатності підприємств з метою отримання ними певних конкурентних переваг.

Методика дослідження.

Методика досліджень базується на статистичному аналізі та математичному моделювання різних даних щодо підприємств, які спеціалізуються на ремонтно-відновлювальних роботах (у тому числі і роботи з використанням реверсивного інжинірингу) та об'єкти, для яких ці роботи виконувались. У ході дослідження використовуються дані про світовий, європейський та регіональні ринки з ремонту техніки та обслуговування обладнання в різних галузях машинобудування, а також матеріали, які присвячені методам реверсивного

інжинірингу. Увага приділяється аналізу динаміки зростання, факторів впливу, основних драйверів та бар'єрів подальшого розвитку цього сегменту.

Виклад основного матеріалу.

При проведенні аналізу ми зіткнулися з тим, що практично всі статистичні дослідження не поділяють промислові підприємства по поняттям технічного обслуговування, ремонту та відновлення (капітального ремонту) і використовують загальне поняття MRO (в деяких дослідженнях - Maintenance, Repair, Overhaul). З іншого боку, різні дослідницькі організації використовували різні підходи при включенні підприємств до цієї групи, тому статистичні дані, наведені у звітах різних компаній, дещо відрізняються. Проте, аналізуючи загальну картину для машинобудівної галузі, ми постаралися вибудувати загальну тенденцію і окремо виділити питання, пов'язані безпосередньо з відновленням деталей, вузлів, агрегатів на основі реверсивного інжинірингу.

Ремонтні роботи у машинобудівній галузі можна умовно розділити на три групи залежно від цього, ким і як ці роботи виконуються (рис.2).

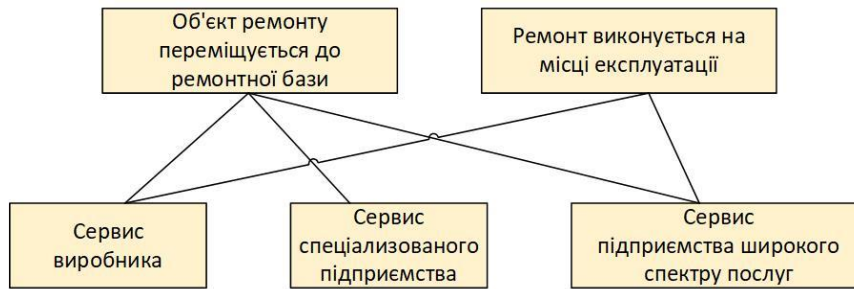


Рис. 2 – Методи організації ремонтних робіт

Перша група - це безпосередньо підприємства-виробники або їх сертифіковані представники з надання послуг MRO. У цьому випадку ремонт, відновлення або модернізація виробів найчастіше здійснюється безпосередньо на підприємстві за рахунок резерву деталей безпосередньо зі складу виробника або за рахунок виготовлення виробником оригінальних деталей за існуючою конструкторсько-технологічною документацією. У цьому випадку у застосуванні реверсивної технології немає необхідності (рис.3).

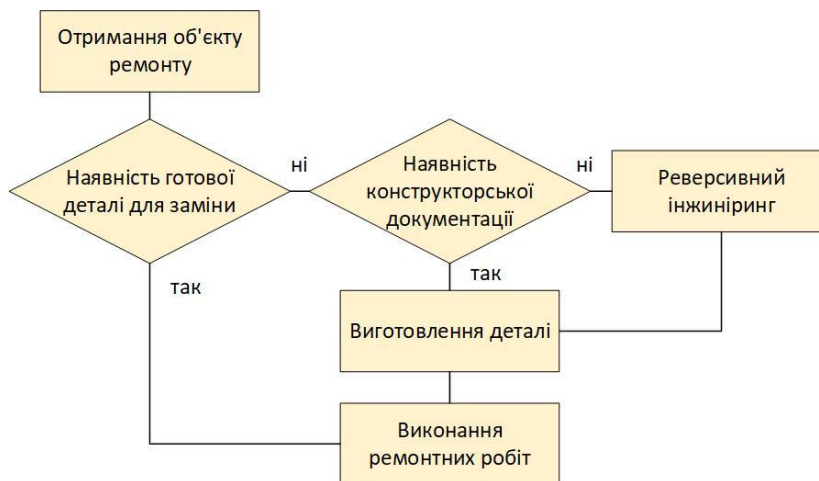


Рис. 3 – Загальна послідовність виконання ремонтних робіт

Друга група - це підприємства, які спеціалізуються на ремонті та відновленні конкретної групи виробів (наприклад, авторемонтні підприємства з ремонту автомобілів та аналогічної техніки). У цьому випадку заміна елементів здійснюється за оригінальними деталями або замовленими у інших виробників аналогами за погодженням із замовником. За наявності відповідних виробничих потужностей, може виготовлятися неоригінальна деталь за наявними кресленнями, технічними вимогами та технологією виготовлення. В окремих випадках такі підприємства використовують реверсивний інжиніринг для отримання конструкторсько-технологічної документації.

Третя група - це підприємства, які спеціалізуються на відновленні деталей та елементів різного призначення. Причому в більшості випадків відсутня конструкторська документація, технологія і технічні вимоги для виготовлення деталі, що вийшла з ладу. Виготовлення таких деталей здійснюється після виконання операцій реверсивного інжинірингу. Зазвичай ремонтні роботи у цьому випадку складаються з кількох етапів: аналіз об'єкта обробки, реверсивний інжиніринг та виготовлення деталі здійснюється на спеціалізованому підприємстві, а встановлення деталі та загальний монтаж виробу зазвичай здійснюється безпосередньо на

підприємстві замовника. У деяких випадках, коли об'єкт ремонту неможливо або недоцільно демонтувати та доставляти на спеціалізоване підприємство (наприклад, турбіни електростанцій, гірнична техніка та ін.) аналіз об'єкта обробки та сканування об'єкта виконується безпосередньо на місці експлуатації машини чи агрегату. В залежності від складності проекту реверсивний інжиніринг в даному випадку може виконуватись виїзною бригадою співробітників спеціалізованого підприємства безпосередньо на місці експлуатації об'єкту або на об'єкті виконуються тільки підготовчі роботи зі сканування та попередньої розробки 3D моделі, а вже остаточно модель та необхідна документація формується на підприємстві з використанням спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення (див. рис.2).

Однією з тенденцій сучасного машинобудування є зростання сектора, пов'язаного з ремонтом, модернізацією та відновленням виробів. Особливо це притаманно до сегментів машинобудівного виробництва «важких» і «великих» виробів переважно промислового і транспортного устаткування. Так, обсяг світового ринку MRO у 2021 р. становив 630 млрд USD з прогнозом 700,8 млрд на 2025 і зростання до 779 млрд USD у 2030 р. (CAGR 2,33-2,4%) [7].

У найбільш розвинених країнах Європи, США та Японії спостерігається стабільне зростання ремонту та обслуговування машинобудівної продукції, причому в основному на базі аутсорсингу (у 2024 році цей показник біля 40% зі зростанням до 45% у 2030) [8]. Близько 88% підприємств у розвинених країнах віддають більше 23% робіт з ремонту та технічного обслуговування машинобудівного обладнання спеціалізованим компаніям [9]. Причому, основна частка обсягу таких робіт припадає на МСП, які завдяки своєю гнучкості та швидкості переозброєння, дозволяють вирішувати поставлені завдання у найкоротші терміни.

Такий підхід обумовлений тим, що сучасні ремонтні технології вимагають достатньо високого рівня автоматизації підготовчих процесів (сканування пошкоджених деталей, їх наступне моделювання та корекція, використання оригінальних технологій відновлення, спеціального обладнання та ін.). Тому економічно більше вигідно звернутися за відновленням деталей та проведенням ремонтних робіт у спеціалізовану компанію з кваліфікованим персоналом, ніж містити штат ремонтників та обладнання, яке не може бути повністю завантажено безпосередньо на підприємстві.

У країнах, що розвиваються, ринок ремонтних робіт постійно розширюється за рахунок збільшення в експлуатації кількості машин та обладнання (в основному яке вже використовувалось і зношеного в різній ступень) та необхідності підтримувати це обладнання в робочому стані.

У глобальному масштабі динаміка обсягів ремонтних робіт у машинобудуванні та суміжних галузях (електроніка, машини та обладнання) також не є предметом регулярної публікації у вигляді окремих статистичних досліджень. Більшість міжнародних організацій, які займаються збором та організацією статистичних досліджень та публікують свої звіти (з зразка OECD, Eurostat, Statista), ведуть спостереження за загальним виробництвом машинобудування, обсягами сервісу/ремонті разом із послугами на ринку сервісу обладнання - MRO. Однак в цих звітах підкреслюється, що частка ремонту у загальному обсязі робіт з MRO у цих дослідженнях займає домінуюче становище [9].

На рисунку 4 наведено усереднені за останні 20 років частки різних сегментів машинобудування у виконуваному обсязі ремонтних робіт.

Найбільший обсяг ремонтних робіт (62-70%) посідає промислове обладнання, транспорт, будівельна і сільськогосподарська техніка. Ремонт електроустаткування складає близько 10-15%. Частка ремонту промислової електроніки та оптичного обладнання (приладобудівні галузі) становить близько 10%, проте є дуже важливим компонентом у високотехнологічному секторі економіки (дорогоє медичне обладнання, інформаційні системи, системи контролю, системи зв'язку та ін.) і тому тенденції зниження частки цього сектора не спостерігається. Ремонт побутової техніки, електроніки, недорогих приладів займає найменшу частку до 6%, і ця частка постійно зменшується з 10% у 2005 році.



Рис. 4 – Обсяг ремонтних робіт по галузям

Такий розподіл пов'язаний насамперед із тим, що термін служби виробів сегменту досить дорогого промислового обладнання значно перевищує термін служби побутової техніки та електроніки, особливо з погляду морального старіння та вартості. Це пояснюється все більшою швидкістю впровадження досягнень науково-технічного прогресу в цих галузях (поява нових функцій, покращення технічних характеристик та ергономічності тощо) при відносно невисокою вартості самих виробів.

Європейські компанії генерують понад 30% глобального світового MRO-ринку за обсягами [8]. В цьому сегменті в Європі задіяні як глобальні корпорації, так і безліч середніх і малих підприємств. Європейський Союз на рівні політики підтримує розвиток ремануфактури (remanufacturing – повторення виробничого циклу виготовлення на основі оригінальних специфікацій продукту з використанням відремонтованих або нових деталей), що є близьким до реверсивного інжинірингу напрямом дуже популярної зараз циркулярної економіки, тому ми не будемо розділяти ці параметри у статистичних дослідженнях стосовно Європи. Якщо розглядати обсяг товарообігу ремонтних робіт з усіх галузей у країнах Європи, то спостерігається регулярне лінійне зростання товарообігу в середньому на 4-8% на рік із просіданням під час світової економічної кризи 2008-2009р.р. та пандемії COVID -19 2020р. (близько 7-10%), з досягненням \$360 млрд обороту у 2030 році [7]. Як видно з графіку (рис.5) у 2021 році спостерігається більше різке відновлення та подальше рівне зростання товарообігу ремонтних робіт, що пов'язано в першу чергу із затримками поставок нової техніки та відсутністю належного обслуговування обладнання за період пандемії.

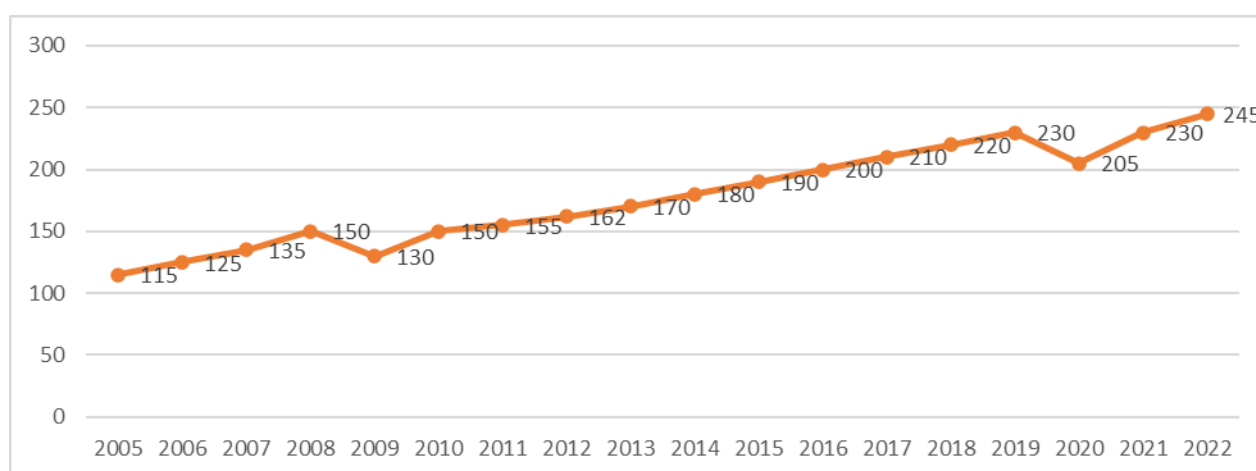


Рис. 5 –Товарообіг ремонтних робіт у машинобудівних галузях Європи, млрд. євро

За даними [10] ці показники дещо нижчі за 125,3 млрд.євро у 2022 році з приростом CAGR 3,8% на рік за період 2017-2022 років. Очікується, що товарообіг досягне 141,53 млрд євро до 2030 року при середньорічному темпі зростання 2,05% протягом прогнозованого періоду (2025-2030 роки). Таку відмінність можна пояснити тим, що до цього звіту увійшли лише країни Європейського Союзу з розвинутою економікою, до яких таке

зростання трохи нижче, ніж для країн з економікою, що розвивається. А також це пов'язано з включенням до статистичних даних товарообігу підприємств, які виконують не лише роботи пов'язані з MRO.

Розвиток MRO в Україні приблизно відповідає світовим тенденціям, і, на жаль, відносить нас до країн, що розвиваються, з широким споживанням техніки, що вже була у використанні. За офіційною статистикою, обсяг реалізованої продукції в сегменті ремонту і монтажу машин та обладнання у другій половині 2010-х зростав стійкими темпами – з близько 43,7 млрд грн у 2016 році до 78,2 млрд грн у 2020 році [11], у тому числі, за оцінками експертів, біля 20% індустріального ремонту пов'язано із застосуванням реверсивного інжинірингу (особливо у військово-промисловому, енергетичному та транспортному секторах), коли відсутня можливість купити оригінальні деталі та немає необхідної документації. У 2022 році спостерігався спад обсягу робіт внаслідок війни, але, згідно з Мінекономікою, у 2023 році витрати знову почали зростати через масштабне відновлення інфраструктури та військової техніки [12]. Так, наприклад, за даними Укрзалізниці та Міненерго, після 2022 року близько 35% усіх робіт із відновлення залізничного парку включали елементи, виготовлені на основі реверсивного інжинірингу (сканування, 3D-друк, заміщення імпортованих запчастин). Тобто, тенденції використання реверсивного інжинірингу в Україні відповідають світовим, або трохи вище.

Проте, реальна потреба в реверсивному інжинірингу в Україні значно вища через різні фактори (необхідність відновлення та підтримки у робочому стані застарілої та зруйнованої внаслідок війни критичної інфраструктури, ремонт військової та сільськогосподарської техніки, транспорту та ін.). Однак використання основних компонентів реверсивного інжинірингу - адитивних технологій, обладнання для високоточного сканування та створення 3D моделей нижче, ніж у середньому по Європі через його відносно високу вартість та обмежений доступ до сучасних ресурсів.

Реверсивний інжиніринг як окремий сегмент інженерних послуг набув поширення в різних галузях протягом останніх двох десятиліть. Обсяги робіт з реверсивного інжинірингу важко оцінити в грошовому виразі, оскільки значна частина виконується внутрішньо на підприємствах (наприклад, виготовлення запасної частини для власного обладнання). Втім, з'явився і комерційний ринок послуг реверс-інжинірингу – спеціалізовані фірми, що на замовлення оцифровують деталі та створюють інженерну документацію, а іноді і виробляють деталі. В даний час частка робіт із застосуванням реверсивного інжинірингу становить 15-20% від загального обсягу ремонтних робіт, особливо у високотехнологічних областях. За оцінками, світовий ринок послуг реверсивного інжинірингу становив приблизно \$1,5 млрд у 2024 році з прогнозом зростання до \$3,2 млрд у 2033 році (близько 9% на рік) [13]. За оцінками аналітиків з різних джерел, ринок реверсивного інжинірингу зростатиме темпами від 9% [13] до 12–16% щорічно і до 2030 року очікується подвоєння обсягів виконання робіт [14]. Причому його частка може досягати 30-40% на підприємствах із морально застарілим обладнанням чи імпортованою технікою, де немає доступу до документації чи запчастин [8]. Проте на сучасних автоматизованих виробництвах частка реверсивного інжинірингу знижується до 5–10% [15].

Виклики війни спричинили необхідність ще активнішого відновлення техніки, тому надалі очікується попит на технології реверсивного інжинірингу для відбудови промисловості. Уже зараз в Україні з'являються ініціативи з цифровізації інженерії: наприклад, волонтерські проекти 3D-сканування уламків техніки для виготовлення нових деталей, співпраця з європейськими виробниками 3D-обладнання (компанія “Artec 3D” заявила про підтримку України своїми 3D-сканерами для відновлення об'єктів) тощо.

Таким чином, як показав аналіз, основними факторами, що сприяють зростанню ринку реверсивного інжинірингу є:

1. Скорочення життєвого циклу обладнання для промислово розвинених країн сприяє його перетіканню на підприємства в країні Європи, Африки та Азії з економікою, що розвивається. Це вимагає виконання додаткових робіт по ремонту для відновлення функціональності такого обладнання.
2. Виробники оригінальних запчастин зі зняттям виробів із виробництва часто припиняють постачання їх окремих вузлів і деталей, що збільшує попит на відтворення деталей для ремонту, найчастіше за відсутності необхідної документації.
3. Впровадження наукових досягнень, що постійно вдосконалюються, в області 3D сканування, моделювання, адитивних та субтрактивних технологій дозволяють створювати копії складних деталей будь-якої форми, роблять процеси реверсивного інжинірингу швидкими, точними та масово доступними, прискорюючи ремонт та модернізацію обладнання.
4. Реверсивний інжиніринг дає можливість не тільки відтворити вихідну деталь, але й провести аналіз пошкоджень та виявити її конструктивні недоліки для коректного відновлення або поліпшення конструкції, що особливо важливо при запуску виробів в експлуатацію.
5. Зростання інтересу до ретроспективної техніки, коли відновлення її комерційного вигляду та працездатності можливе лише з використанням елементів реверсивного інжинірингу.

Висновки

1. Ринок ремонту та реверсивного інжинірингу за останні 10–15 років демонструє стабільний ріст у світі та Європі, зумовлений як економічними чинниками (прагнення максимально використати ресурс наявної техніки, знизити витрати), так і технологічними здобутками (цифровізація інжинірингу, 3D-друк, прогнозне обслуговування). Україна, попри спад традиційного

машинобудування, також розвиває цей напрям – потреба підтримувати працездатність інфраструктури й техніки робить ремонтно-інжинірингові послуги стратегічно важливими.

2. Зростання частки реверсивного інжинірингу в загальному обсязі ремонтно-відновлювальних робіт дозволяє виділити послуги з зворотного проектування або реверсивного інжинірингу в окремий комерційний напрям для інжинірингових та сервісних компаній. Це веде до появи нових бізнес-моделей у секторі технічного обслуговування, ремонту та модернізації, а також до збільшення частки аутсорсингу при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт. Для галузей, які використовують високотехнологічне, унікальне або дороге обладнання, реверсивний інжиніринг може стати стандартною частиною сервісного обслуговування.

3. Розвиток сучасних комп'ютерних технологій і цифровізація виробничих процесів відкриває нові широкі можливості для організації реверсивного інжинірингу пошкоджених або зношених деталей, особливо в тих випадках, коли немає доступу або втрачена конструкторська документація. В цьому випадку використовують 3D моделі створені на основі комп'ютерних технологій отримання та обробки графічної інформації. Але для впровадження цих моделей потрібно виконати підготовку виробництва, тобто розробити конструкторську та технологічну документацію для подальшого використання у виробничому процесі. Тому питання підвищення точності та якості таких моделей є актуальними.

4. Реверсивний інжиніринг із вузької інженерної практики перетворився на масове явище, усі підприємства від великих до малих беруть його на озброєння. Як показав аналіз в наступні роки ця тенденція збережеться: підтримка працездатності існуючих машин і ефективне відтворення деталей залишатимуться важливою складовою машинобудівного бізнесу у всьому світі. Це є шляхом до сталого, економічного та швидкого інжинірингу майбутнього, де нові вироби народжуються не тільки на креслярській дошці, а й через аналіз та вдосконалення старих.

Список літератури:

1. The American Heritage Dictionary, Second College Edition. Houghton Mifflin Co., 1985.
2. ДСТУ 9050:2020 СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУВАННЯ ТЕХНІКИ Терміни та визначення зрозуміти. URL: <http://uas.org.ua> (дата звернення: 24.04.2025)
3. The maintenance function, як manufacturing itself, is a rapidly changing environment URL: <https://www.plantengineering.com/the-maintenance-function-like-manufacturing-itself-is-a-rapidly-changing-environment> (дата звернення: 24.04.2025)
4. Abella RJ, Daschbach JM, McNichols RJ Reverse engineering industrial applications (1994) Computers and Industrial Engineering, 26 (2), pp. 381 - 385 DOI: 10.1016/0360-8352 (94) 90071-X
5. Raja V., Fernandes KJ Reverse Engineering : An Industrial Perspective. (2008) Springer Series in Advanced Manufacturing, pp. 1 – 239
6. Пермяков О.О., Яковенко І.Є., Калініченко В.А., Скиба О.С., Южкович П. : зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 91–99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2 (8).10.
7. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share & Trends Analysis Report By MRO Type (Industrial MRO, Electrical MRO, Facility MRO, Other MRO Types) and By Region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2022-2030. URL: <https://stratisticsresearch.com/report/maintenance-repair-and-operations-market> (дата звернення: 24.04.2025)
8. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share, Trends and Forecast by Provider, MRO Type, and Region, 2025-2033. URL: <https://www.imarcgroup.com/maintenance-repair-operations-market> (дата звернення: 24.04.2025)
9. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (дата звернення: 24.04.2025)
10. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (дата звернення: 24.04.2025)
11. Промисловість України у 2016–2020 роках статистичний збірник Industry of Ukraine / За ред.І. ПЕТРЕНКО. Державна служба статистики України, 2021. – 296с.
12. Держстат України – Розділ 30.10, 2023 URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/fin/osp/orps/orps_u/arch_orps_u.htm (дата звернення: 24.04.2025)
13. Reverse Engineering Service Market Overview. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/reverse-engineering-service-market> (дата звернення: 24.04.2025)
14. Power Plant Maintenance Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Power Plant Type, by Services, by Equipments : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031 URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/power-plant-maintenance-market-A47448> (дата звернення: 24.04.2025)
15. Aircraft Engine MRO Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Platform (Commercial and Civil Aircraft (Narrow Body, Wide Body, Regional Aircraft, Business Jet, Trainers and Turboprops, and Commercial Helicopters) and Military Aircraft (Multirole and Combat, Military Transport Aircraft, Military Trainers, and Military

Helicopters), By Component (Compressor, Combustor, Nozzle, Fan Blades, Sensors, Actuators, and Others), By Engine Type (Piston Engine and Turbo Engine (Turbo Shaft, Turbo Prop, Turbo Fan, and Turbo Jet), and Regional Forecast, 2023-2030 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/aircraft-engine-mro-market-108858> (дата звернення: 24.04.2025)

Bibliography (transliterated):

1. The American Heritage Dictionary, Second College Edition. Houghton Mifflin Co., 1985.
2. DSTU 9050:2020 SYSTEMA TEKHNIČNOHO OBSLUHOVUVANNYA TA REMONTUVANNYA TEKHNIKY Terminy ta vyznachennya zrozumity. URL: <http://uas.org.ua> (data zvernennya: 24.04.2025)
3. The maintenance function, як manufacturing itself, is a rapidly changing environment URL: <https://www.plantengineering.com/the-maintenance-function-like-manufacturing-itself-is-a-rapidly-changing-environment> (last access: 24.04.2025)
4. Abella RJ, Daschbach JM, McNichols RJ Reverse engineering industrial applications (1994) Computers and Industrial Engineering, 26 (2), pp. 381 - 385 DOI: 10.1016/0360-8352 (94) 90071-X
5. Raja V., Fernandes KJ Reverse Engineering : An Industrial Perspective. (2008) Springer Series in Advanced Manufacturing, pp. 1 – 239
6. Permyakov O.O., Yakovenko I.Ye., Kalinichenko V.A., Skiba O.S., Yuzhkovich P. : zb. nauk.pr. / Nac. tehn. un-t «Harkiv. politehn. in-t». – Harkiv: NTU «HPI», 2023. № 2 (8) 2023. – S. 91–99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2 (8).10.
7. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share & Trends Analysis Report By MRO Type (Industrial MRO, Electrical MRO, Facility MRO, Other MRO Types) and By Region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2022-2030. URL: <https://straitsresearch.com/report/maintenance-repair-and-operations-market> (last access: 24.04.2025)
8. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share, Trends and Forecast by Provider, MRO Type, and Region, 2025-2033. URL: <https://www.imarcgroup.com/maintenance-repair-operations-market> (last access: 24.04.2025)
9. Maintenance statistics and trends 2025/ URL: <https://blog.infraspeak.com/maintenance-statistics-trends-challenges> (last access: 24.04.2025)
10. Industrial production statistics/ URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> (last access: 24.04.2025)
11. Promisloviť ukrajini u 2016–2020 rokah statističnij zbirnik Industry of Ukraine / Za red.I. PETRENKO. Derzhavna sluzhba statistiki Ukrajini, 2021. – 296s.
12. Derzhstat Ukrajini – Rozdil 30.10, 2023 URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/fin/osp/orps/orps_u/arch_orps_u.htm (data zvernennya: 24.04.2025)
13. Reverse Engineering Service Market Overview. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/reverse-engineering-service-market> (last access: 24.04.2025)
14. Power Plant Maintenance Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Power Plant Type, by Services, by Equipments : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031 URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/power-plant-maintenance-market-A47448> (last access: 24.04.2025)
15. Aircraft Engine MRO Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Platform (Commercial and Civil Aircraft (Narrow Body, Wide Body, Regional Aircraft, Business Jet, Trainers and Turboprops, and Commercial Helicopters) and Military Aircraft (Multirole and Combat, Military Transport Aircraft, Military Trainers, and Military Helicopters), By Component (Compressor, Combustor, Nozzle, Fan Blades, Sensors, Actuators, and Others), By Engine Type (Piston Engine and Turbo Engine (Turbo Shaft, Turbo Prop, Turbo Fan, and Turbo Jet), and Regional Forecast, 2023-2030 URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/aircraft-engine-mro-market-108858> (last access: 24.04.2025)

Надійшла (received) 08.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) – кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X.

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: permy_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194.

Музичка Діана Геннадіївна (Muzychka Diana) – доцент, к.т.н, доцент кафедри машинобудівних технологій Дніпровського державного технічного університету, м. Кам'янське, Дніпропетровської області Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine; Scopus ID: 57205359480,

Моб. 0677676234, diana_m@i.ua, ORCID: 0000-0002-2914-9672

Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr) – кандидат технічних наук,, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м.Чернівці, вул. Коцюбинського,2., тел. +38050 9792460, E_mail gorbulic@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>