

Фадєєв Андрій Валерійович, докторант кафедри Технології машинобудування та металорізальних верстатів, +38(067)570-58-10, fan17@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002

СУЧАСНИЙ СТАН ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА КОНСТРУКЦІЙ

***Анотація.** У статті розглянуто концепцію технологічного забезпечення процесів відновлення деталей та реверсивного інжинірингу. Показано, що традиційні підходи до ремонту та відновлення не забезпечують необхідної точності та ефективності в умовах сучасних вимог до ресурсу та надійності виробів. Відновлення зношених деталей залишається дуже важливим резервом підвищення ефективності використання техніки, економії матеріальних, паливно-енергетичних і трудових ресурсів. Технічна та економічна доцільність відновлення деталей зумовлена можливістю повторного (дуже часто неодноразового) використання 65–75 % деталей. Собівартість відновлення зношених деталей не перевищує 50 % вартості нових, а витрати на матеріал в 15–20 разів нижчі, ніж під час виготовлення деталей. Наукова новизна роботи полягає у розробленні концептуальної схеми технологічного забезпечення відновлення деталей, яка враховує конструктивні особливості виробу. Практичне значення дослідження полягає у скороченні термінів підготовки виробництва, зниженні собівартості ремонтних процесів та економії матеріальних, енергетичних, трудових і природних ресурсів за рахунок зниження кількості деталей, що надходять на утилізацію.*

***Ключові слова:** реверсивний інжиніринг, концепція, відновлення, технологічний процес, надійність виробів.*

Fadieiev Andrii, doctoral student, Department of «Technology of Mechanical Engineering and Metal-Cutting Machine Tools», +38(067)570-58-10, fan17@gmail.com

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002

CURRENT STATE OF RESTORATION OF MACHINE PARTS AND STRUCTURES

***Abstract.** The article considers the concept of technological support for parts' restoration processes and reverse engineering. It is shown that traditional approaches to repair and restoration do not provide the necessary accuracy and efficiency in the conditions of modern requirements for the resource and reliability of products. Restoration of worn parts remains a very important reserve for increasing the efficiency of equipment use, saving material, fuel, energy and labor resources. The technical and economic feasibility of restoring parts is due to the possibility of repeated (very often repeated) use of 65–75 % of parts. The cost of restoring worn parts does not exceed 50 % of the cost of new ones, and material costs are 15–20 times lower than during the manufacture of parts. The scientific novelty of the work lies in the development of a conceptual scheme for the technological support of the restoration of parts, which takes design features of the product. The practical significance of the study lies in reducing the time for preparing production, reducing the cost of repair processes and saving material, energy, labor, and natural resources by reducing the number of parts sent for recycling.*

***Keywords:** reverse engineering, concept, restoration, technological process, product reliability.*

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інформаційних технологій у машинобудуванні надає нові можливості та альтернативу існуючим підходам до проектування технологічних процесів виготовлення або відновлення деталей. Завдяки розвитку сучасних технологій та сучасного обладнання машинобудування отримало такий потужний інструмент, як зворотний інжиніринг (реверс інжиніринг).

Реверсивний інжиніринг (реверс інжиніринг, зворотне проектування, reverse-engineering) – процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком. Зворотне проектування деталей потрібне, коли необхідне: відновлення втрачених деталей; відновлення зношених або деталей, що вийшли з ладу; збереження інформації про об'єкти для їхнього подальшого ремонту чи відтворення.

Доцільність відновлення деталей зумовлена можливістю повторного використання більшості деталей.

Мета дослідження. На підставі системного аналізу:

- визначити основні чинники спрацювання внутрішніх та зовнішніх поверхонь деталей, способів їх відновлення, причин виникнення і характеру несправності деталей машин.
- розробити концепції та технологічні основи відновлення деталей машин із застосуванням реверсивного реінжинірингу.

Матеріали та методи. При написанні статті були використані технічні, статистичні, математичні, наукові, інформаційні матеріали та методи аналізу. Факторний аналіз, аналіз структури та динаміки, групування інформації.

Теоретичну та методологічну основу проведення досліджень склали наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених із проблем технологічного та метрологічного забезпечення процесів відновлення деталей при реверсивному інжинірингу.

Викладення основного матеріалу. Однією із причин зменшення довговічності нерухомих спряжень є порушення нерухомості з'єднання

внутрішніх та зовнішніх поверхонь, яке відбувається в основному, за рахунок спрацювання зовнішніх поверхонь.

Сучасна практика відновлення у машинобудуванні та, особливо, в аерокосмічній індустрії – це гібрид традиційних технологій (механічна обробка, зварювання, термічні й напилювальні покриття, шліфування, механічне відновлення геометрії, дугове наплавлення, контактна приварка металевого шару, газотермічне напилення, гальванічне нанесення) та нового покоління адитивних і безтермічних методів (лазерне наплавлення, локальні PBF-рішення для заміни компонентів). Впровадження адитивних методів дає змогу скорочувати час простою, зменшувати потребу в запчастинах на складі і виконувати локальні ремонти/відновлення геометрії.

Визначено, що основними чинниками спрацювання зовнішніх поверхонь нерухомих спряжень є фретинг-корозія, рухомих спряжень – абразивне спрацювання, а основним видом руйнування зовнішніх поверхонь деталей типу вал є руйнування від втомленості. Тому при відновленні поверхонь валів, насамперед, необхідно забезпечити високу стійкість поверхонь проти вказаних видів спрацювання.

Процес відновлення деталей – складне конструкторсько-технологічне завдання, під час розв'язання якого, крім геометричних розмірів, частково змінюються деякі характеристики деталі, закладені в ній конструктором: матеріал окремих ділянок, фізико-механічні властивості, шорсткість поверхні тощо. У зв'язку з цим особливої ваги набуває питання проектування технологічного процесу відновлення деталей, під час якого вирішуються питання якості відновлення деталей.

Оскільки проблема відновлення деталей має комплексний характер, для її вирішення можливе застосування системного підходу, який передбачає методологічну орієнтацію вивчення, засновану на розгляді об'єкта у вигляді системи.

Але технології, які на сьогоднішній день використовують для відновлення валів не в повній мірі відповідають зазначеним вимогам. Незважаючи на те, що

дугове наплавлення дозволяє одержувати на відновлюваних поверхнях стійкі проти спрацювання шари, в багатьох випадках це не забезпечує підвищення ресурсу деталей в цілому.

Також при малих величинах спрацювань наплавлення забезпечує великі припуски на механічну обробку, що призводить до значних втрат металу та значно ускладнює технологічний процес відновлення (особливо при обробці шарів високої твердості).

Електроконтактне наварювання металевого шару більш придатне, в порівнянні з наплавленням, для відновлення валів. Хоча при електроконтактному наварюванні і відсутній значний термічний вплив на деталь, але місця, які зазнали впливу потужних імпульсів струму є концентраторами напружень, що також призводить до зменшення стійкості проти втомленості.

Відомі технології відновлення валів газо-термічними способами. Але основними недоліками які стримують їх широке використання є:

- недостатня міцність зчеплення в результаті чого покриття можуть відшаруватись від основи;
- висока пористість, значні залишкові напруження;
- нестабільність властивостей на різних ділянках покриття, що призводить до утворення дефектів.

Проведений аналітичний огляд та дослідження показали, що довговічність авіаційних агрегатів, їх техніко-економічні показники багато в чому визначаються довговічністю нерухомих спряжень вал-підшипник. Тому підвищення довговічності підшипникових вузлів за рахунок зміцнення їх посадочних поверхонь, а також зміцнюючого відновлення є досить актуальною задачею.

Як показали проведені дослідження найбільш перспективним способом для відновлення та зміцнення посадочних місць під підшипники є електромеханічна обробка, яка дозволяє підвищити стійкість і проти фретингу і проти абразивного спрацювання и проти втомленості.

Відновлення деталей ЕМО має ряд переваг: підвищується продуктивність, знижуються витрати електроенергії, відпадає потреба в матеріалах (електродах,

флюсах, газах тощо), виключаються шкідливі викиди в довкілля.

Причини виникнення і розвитку несправностей деталей машин.

Практично будь-яка несправність є наслідком зміни механічних властивостей матеріалу, конструктивних розмірів деталей і стану їхньої поверхні. У свою чергу зміна механічних властивостей, відбувається внаслідок зміни складу і структури матеріалу деталей.

Фактори, що впливають на появу таких змін можна розділити на 3 групи: конструктивні, технологічні та експлуатаційні.

До конструктивних факторів відносяться фактори, що були враховані на стадії проектування:

- конструктивне виконання деталей і складальних одиниць (форма, величина зазорів і натягів у спряженнях, шорсткість і твердість поверхонь і т.п.);
- розрахункові навантаження, швидкості відносного переміщення, від яких буде залежати вибір матеріалу деталі, вид термічної обробки чи хіміко-термічної обробки, а також габаритні розміри;
- умови експлуатації, вид змащення та охолодження деталей і вузлів.

Технологічними факторами є фактори, що виявляються на стадії виготовлення. До них відносяться:

- способи, точність і стабільність одержання заготовок;
- види механічної і фінішної обробки деталей;
- методи зміцнювальної обробки (термічної, хіміко-термічної чи пластичної);
- правильність складання, регулювання, приробки і випробування вузлів, агрегатів і машин.

До експлуатаційних відносяться фактори, обумовлені призначенням машини, її навантажувальними і швидкісними режимами, інтенсивністю експлуатації.

Незалежно від призначення машини, повинні виконуватися умови експлуатації, своєчасність і повнота технічного обслуговування, правильність збереження і перевезення та ін.

Характерні несправності деталей машин

Несправності деталей машин можна розділити на три групи: зношування, механічні ушкодження і хіміко-теплові ушкодження.

Зношування. За видом зношування всі деталі можна поділити на п'ять груп.

До першої групи відносяться деталі, для яких основним фактором, що визначає їхню довговічність, є абразивне зношування (деталі ходової частини, що працюють в умовах недостатнього змащення).

До другої групи відносяться деталі, що зношуються внаслідок пластичного деформування (шліцьові деталі, зубчасті колеса, муфти, маховики і т.п.).

До третьої групи відносяться деталі, що виходять з ладу внаслідок корозійно-механічного зношування (поршні, поршневі кільця, тобто деталі, що працюють в агресивному середовищі).

Четверта група, це деталі, довговічність яких лімітується границею витривалості (шатуни, пружини, болти шатунів, тобто деталі, що працюють при циклічних навантаженнях).

П'ята група, це деталі, у яких довговічність залежить одночасно від зносостійкості поверхонь тертя і границі витривалості матеріалу деталей (шестерні, ЗК редукторів, коробок передач і т.п.).

Механічні ушкодження деталей. Механічні пошкодження в деталях виникають при дії на них в процесі експлуатації навантажень, що перевищують допустимі, а також унаслідок втоми матеріалу. До механічних пошкоджень належать: тріщини, пробоїни, злами і деформації (вигин, скручування, викривлення). Найбільш небезпечними при цьому є тріщини, що можуть привести до серйозних поломок.

Тріщини можуть утворитися як у результаті ударних навантажень, так і в найбільш напружених місцях деталей (у місцях концентрації внутрішніх напружень). Можуть також виникати втомлювані тріщини в результаті тривалого впливу циклічних знакозмінних навантажень. Найчастіше вони з'являються в деталях рам, кузовах, колінчастих валах, поворотних цапфах, ресорах і багатьох інших деталях. Найчастіше тріщини втоми розвиваються в області концентрації напружень (в отворах, в галтелях і т. п.).

Тріщини можуть бути і теплового походження в результаті внутрішніх напружень, як, наприклад, при зварюванні - гарячі і холодні тріщини, або при загартуванні.

Розміри тріщин по ширині коливаються у великих межах: від видимих неозброєним оком до мікроскопічних, які виявляють за допомогою спеціальних приладів.

Деформації виникають в деталях в результаті динамічних навантажень і спостерігаються в таких деталях, як колінчасті вали, шатуни, карданні вали, балки передніх мостів, деталі рам і кузовів і ін.

Скручування деталей виникає від впливу великого крутного моменту. Скручуванню піддаються різні вали, півосі і т.п.

Викришування – дефект характерний для поверхонь деталей, що піддавалися ХТО і що відбувається внаслідок динамічних ударних навантажень у процесі експлуатації (викришування зубців зубчастих коліс).

Викришування може бути також у результаті втомлюваних напруг, наприклад, викришування бабітового шару на вкладишах підшипників ковзання чи на бігових доріжках підшипників кочення.

Хіміко-теплові ушкодження. До таких ушкоджень відносяться: короблення, корозія, нагар (накип), електроерозійне руйнування і т.п. Короблення відбувається в результаті високих температур, що призводять до структурних змін і, як наслідок, появи значних внутрішніх напружень. Так, наприклад, короблення голівки циліндрів автотракторних двигунів.

Корозія – процес руйнування металів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії їх з навколишнім середовищем. Результати корозії з'являються у вигляді суцільних окисних плівок або у вигляді місцевих пошкоджень (плям, раковин і ін.). Дії корозії піддаються багато деталей автомобілів.

Для устаткування характерні суцільна або місцева корозії. Велику небезпеку представляє місцева (вибіркова) корозія. Оцінювати і прогнозувати процеси розвитку місцевої корозії практично неможливо, тому вона в багатьох

випадках призводить до раптового виходу конструкції з ладу. Значно знижує працездатність звареної конструкції міжкристалічна корозія по лінії сплавлення.

У більшості випадків технологічне устаткування піддається одночасно механічним і хімічним впливам. У результаті спільного впливу механічного і корозійного факторів у поверхневих шарах металу відбуваються взаємозалежні явища, що сприяють активації процесів деформування, руйнування, хімічних і електрохімічних реакцій. Особливо інтенсивно процес руйнування відбувається при терті в корозійному середовищі.

Зміна фізико-механічних властивостей матеріалу деталей в процесі експлуатації автомобілів виражається найчастіше в зниженні твердості і пружних властивостей.

Зміна властивостей деталей може статися в результаті їх нагріву в процесі роботи до температури, що впливає на термообробку, а також унаслідок спрацьовування поверхневого шару, зміцненого методами хіміко-термічної обробки.

Пружні властивості деталей знижуються унаслідок втоми матеріалу, з якого вони виготовлені. Цей дефект часто виникає в таких деталях, як пружини клапанів і ресори.

Існують і інші різновиди зношування як:

- гідроабразивне зношування, що відбувається в результаті впливу на поверхню металу твердих абразивних частинок у складі технологічної рідини;
- ерозійне зношування, що відбувається внаслідок ударних впливів турбулентних струменів;
- кавітаційне зношування, що відбувається в результаті впливу на поверхню металу мікроударних навантажень, які виникають при утворенні кавітаційних порожнин і пухирців;
- електроерозійне руйнування, що виникає в результаті впливу на поверхню деталей іскрових розрядів. При такому руйнуванні електрони, що вилітають з катода, вибивають з поверхні деталі (анода) частки металу, які розсіюються в навколишньому середовищі. Такі ушкодження виникають на електродах свіч, на

контактах електричних приладів (переривачів, розподільників та ін.).

Природне і аварійне зношення

Природне зношення механізмів зростає із збільшенням часу роботи механізмів. Проте поступове кількісне наростання зношеного металу лише до певної границі не спричиняє якісних змін в роботі механізму і, вочевидь, лише до цієї границі зношення може вважатися природним (нормальним). За вказаною границею настає аварійне зношення. На рис. 1 представлена крива наростання зношення пари працюючих деталей.

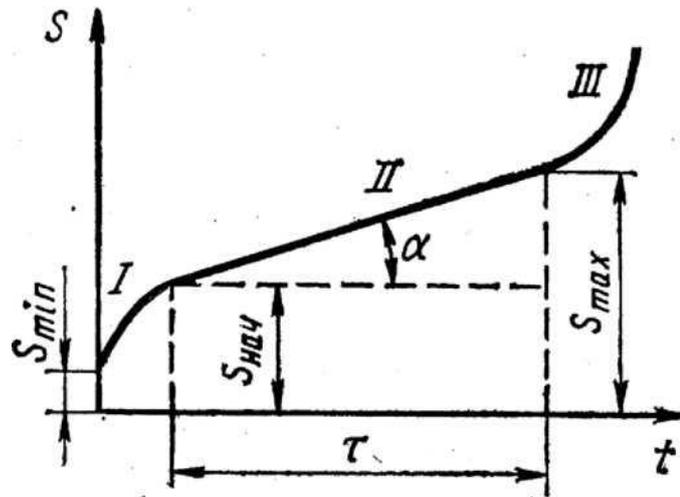


Рисунок 1 – Інтенсивність зношування в часі. *Розроблено автором.*

Крива справедлива для більшості задовільно сконструйованих рухливих з'єднань, що працюють в сталому режимі. Вона має три явно виражених ділянки: початкова I, яка характеризує процес прироблення нового з'єднання; кінцева III, яка відповідає періоду руйнування з'єднання унаслідок зношення його понад допустимої границі (аварійне зношення), і проміжна ділянка II, яка найбільша по протяжності, відповідає періоду нормальної роботи з'єднання (природне зношення). При оцінці міжремонтного терміну служби з'єднання ділянки I і III необхідно виключати, оскільки початком нормальної роботи з'єднання слід вважати момент закінчення прироблення, а кінцем досягнення граничного допустимого зношення. В такому разі міжремонтний термін служби будь-якого задовільно сконструйованого з'єднання, що працює в сталому режимі може бути виражений наступною залежністю:

$$\tau = S_{max} - S_{нач} / tga,$$

де τ – міжремонтний термін служби сполучення, год; S_{\max} – граничне допустиме ослаблення посадки при зношенні (гранично допустимий зазор); $S_{нач}$ – величина, що характеризує початкову посадку (початковий зазор) з'єднання, яке прироблене; tga – інтенсивність зношення з'єднання (наростання зазору), год.

Згідно з приведеною залежністю, заданий міжремонтний термін служби з'єднання може бути забезпечений в результаті вживання заходів, що дозволяють підтримувати в необхідних межах значення чисельника і знаменника. Підтримка певної (не вище нормальної) інтенсивності зношення забезпечується технічним доглядом за машиною, а підтримка певної (не нижче нормальної) посадки забезпечується під час ремонту.

Дійсно, якщо прийняти незмінними межі розширення посадки, то збереження кута нахилу прямолінійної ділянки кривої буде єдиним шляхом забезпечення заданого міжремонтного терміну служби. Для цього необхідно застосовувати належне мастило, доброякісні експлуатаційні матеріали, правильне регулювання, дотримувати правила пуску і управління і т. д. Під час ремонту можна впливати на величину інтенсивності зношення лише в тих випадках, коли модернізують з'єднання (вводять додаткові деталі) або змінюють технологію обробки деталей (застосовують зносостійкі покриття).

Перший період роботи характеризується інтенсивним зношенням за порівняно малий період часу – це час приробки деталей. Зношення у цей період багато в чому залежить від шорсткості поверхні, умов змашування і навантаження.

Другий період, найбільший по тривалості, відповідає нормальній роботі деталі. Інтенсивність зношення при цьому залежить від умов експлуатації, своєчасного і якісного технічного обслуговування.

Третій період характеризується інтенсивним наростанням зношення внаслідок збільшення зазорів у спряженнях, що супроводжується порушенням умов змащення, перегріванням, підвищеним шумом. Деталі, що мають граничні зношення, до роботи не допускаються і повинні бути замінені чи відновлені.

Граничним зношенням називається зношення, що відповідає

граничному стану виробу, що зношується.

Допустимим зношуванням називають зношування, при якому виріб може зберігати працездатність протягом міжремонтного періоду.

Питання про визначення допустимого спрацьовування деталей під час ремонту зводиться до пошуку такої його величини, яка забезпечує безвідмовну роботу агрегату протягом чергового міжремонтного періоду. Не припускаючись великої похибки, можна прийняти, що залежність спрацьовування деталей від напрацювання має лінійний характер (рис. 2).

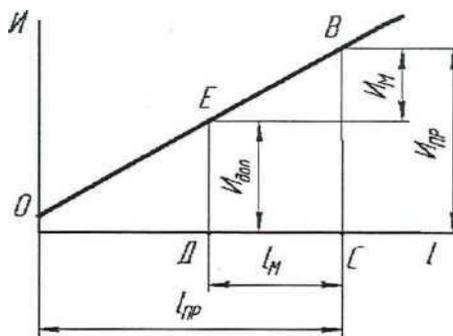


Рисунок 2 – Залежність спрацьовування деталей від напрацювання.
Розроблено автором.

Нехай величина граничного спрацьовування відома і дорівнює $BC = I_{пр}$. Відклавши від точки C , що визначає напрацювання деталі до граничного спрацьовування, відрізок CD , рівний міжремонтному періоду, і відновивши перпендикуляр з точки D до перетину з прямою OB , отримаємо відрізок DE , величина якого і визначить допустиме спрацьовування деталі $I_{дон}$. З рис. 2 видно, що величина допустимого спрацьовування

$$I_{дон} = I_{пр} - I_{м},$$

де $I_{м}$ – величина спрацьовування деталі за міжремонтний період.

Величину спрацьовування деталі за міжремонтний період визначають, як середню арифметичну величину шляхом вимірювання партії деталей, знятих з авіаційних агрегатів, що поступили в ремонт.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було доведено необхідність попередньої діагностики підприємства до впровадження технології відновлення, а також реверсивного інжинірингу зношених деталей. Це дозволить

підприємствам оцінити свої можливості та обмеження, обґрунтувати ефективність реалізації технологічних рішень відновлення зношених деталей.

Таким чином, запропоновано підхід до здійснення технологічного реінжинірингу на підприємствах машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна стратегія Індустрії 4.0, АППАУ. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-zrozhinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html> (дата звернення: 12.01.2022).
2. Попов О. В. (2022) Технологічний реінжиніринг промислових підприємств / Монографія / Пер.з англ.; Пер.з рос.: О.В. Попов. Видавництво Харків, вид. «Центр поліграфії» м. Харків, пр. Науки, 7, e-mail nauki007@gmail.com, тел. 702-13-88, 251 арк., укр. (11,4 авт. арк.).
3. Мехович С. А. Формирование региональных межотраслевых связей на основе концепции технологического реинжиниринга: монография. Харків : «Щедра садиба», С. 352.
4. Фадеев В. А. Синтез технологических систем механической обработки. Харків : НТУ «ХПИ», 2007. 187 с.
5. [Електронний ресурс.] Джерело інформації:<http://upr-search.com.ua/44-promyshlennost-ukrainy-obshhij-vzglyad.html>
6. Мехович С. А. Экономические проблемы гибких производственных систем: Монография. Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. 232 с.
7. Demirkan H., Spohrer J. C., Welser J. J. Digital Innovation and Strategic Transformation. *IT Professional*. 2016:14–18. URL: <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.115>.

REFERENCES:

1. Nacionalna strategiya Industriyi 4.0, APPAU. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-zrozhinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html> (data zvernennya: 12.01.2022).
2. Popov O.V. (2022) Tehnologichnij reinzhiniring promislovih pidpriyemstv / Monografiya / Per.z angl.; Per.z ros.: O.V. Popov. Vidavnictvo Harkiv, vid. «Centr poligrafii» m. Harkiv, pr. Nauki, 7, e-mail nauki007@gmail.com, tel. 702-13-88. 251 ark., ukr. (11,4 avt. ark.)
3. Mehovich S. A. Formirovanie regionalnyh mezhotraslevykh svyazey na osnove koncepcii tehnologicheskogo reinzhiniringa: monografiya. Kharkiv : «Shedra sadiba plyus», s. 352, pril. 7., ukr.
4. Fadeev V. A. Sintez tehnologicheskikh sistem mehanicheskoy obrabotki. Kharkov : NTU «HPI», 2007. 187 s.
5. [Elektronnij resurs.] Dzherelo informaciyi: <http://upr-search.com.ua/44-promyshlennost-ukrainy-obshhij-vzglyad.html>
6. Mehovich S. A. Ekonomicheskie problemy gibkikh proizvodstvennykh sistem: Monografiya. Kharkov : NTU «HPI», 2007. 232 s.
7. Demirkan H., Spohrer J. C., Welser J. J. Digital Innovation and Strategic Transformation. *IT Professional*. 2016:14–18. URL: <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.115>.

Стаття надійшла до редакції: 02.12.2025; рецензування: 22.12.2025;

прийнята до публікації 05.01.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 02.12.2025; revised on 22.12.2025; and accepted for publication on 05.01.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.