

**Лук'янюк С.В.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## СТРАТЕГІЇ ВІДНОВЛЮВАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА У ЕЛЕКТРОННІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Останніми роками сфера відновлюваного виробництва, зокрема відновлювальне виробництво у галузі електроніки, привертає до себе значну увагу завдяки своїм різноманітним перевагам і ключовій ролі у реалізації фундаментальних принципів циркулярної економіки та сталого розвитку. Позиціонуючись як незамінне рішення на завершальному етапі життєвого циклу продукту, відновлюване виробництво вирізняється своєю винятковою здатністю модернізувати продукцію, відновлюючи її якість на рівні з новими аналогами. Цей відновлювальний потенціал підкреслює нагальну необхідність надання пріоритету відновлюваному виробництву над іншими доступними альтернативами. У роботі досліджено різноманітні стратегії життєвого циклу, розроблені для підвищення ефективності процесів відновлення. У цих стратегіях висвітлюються процеси, які охоплюють весь життєвий цикл продукту – від заходів перед відмовою до втручань під час відмов і продовжуючи до втручань після закінчення життєвого циклу. Головна мета цих стратегій – суттєво підвищити ймовірність того, що виріб буде модернізовано, а не віддано на переробку чи утилізацію. У роботі проаналізовано ключові стратегії, кожна з яких представляє окремий аспект відновлюваного виробництва. Дослідження сфери дизайну, адаптованого до відновлюваного виробництва, висвітлює інноваційні шляхи в дизайні продукції, забезпечуючи її придатність до відновлення. Водночас, приділяється увага сфері оцінки залишкового ресурсу, використовуючи складні методології для прогнозування залишкового терміну корисного використання продуктів, що дозволяє приймати рішення щодо подальшого використання продукції. Разом з цим розглядається впровадження передових систем сервісу продукції, підкреслюючи їхню роль у інтеграції принципів відновлення у ринковий ландшафт. У роботі також досліджуються складні питання ефективного управління закінченням життєвого циклу, аналізуючи нюанси втручань, які можуть суттєво вплинути на долю продукту після його використання. Ретельно розглядаються критичні аспекти збору продукції та зворотної логістики, розкриваються тонкощі організації безперебійного потоку продукції від кінцевих споживачів назад в екосистему відновлюваного виробництва. Вкрай важливо визнати обмеження, притаманні цій парадигмі, а також те, що не всі продукти мають потенціал до відновлення. Як наслідок, цей огляд акцентує увагу, зосереджену саме на продуктах, які мають потенціал для повторного виробництва.*

**Ключові слова:** відновлюване виробництво, термін служби, економіка замкнутого циклу, дизайн для відновлюваного виробництва, остаточний термін служби, електроніка.

**Постановка проблеми.** У промисловості електричного та електронного обладнання (EEE – electrical and electronic equipment) розгорнуто масове виробництво, що спричинене такими факторами, як технологічні інновації та зростання споживчого попиту. Як це не парадоксально, така масовість виробництва співпала зі скороченням середнього терміну служби продуктів EEE. Як прямий наслідок цього прискореного темпу виробництва, стався відповідний сплеск відходів електричного та електронного обладнання (WEEE – waste electrical and electronic equipment) або електронних відходів. У цьому контексті актуальною стає технологія відновлення, концепція, яка має величезні перспективи для впровадження в промисловості електронного виробництва.

Відновлення – є основним рішенням після завершення терміну служби (EoL – end-of-life), що включає ретельне розбирання, ретельне очищення, ретельну перевірку всіх компонентів, ремонт відновлюваних частин і заміну зношених елементів новими, що завершується ретельною перевіркою. Повторне складання та суворе тестування виробів для відновлення їх стану. У різноманітні альтернатив відновлення EoL, включаючи повторне використання, реконструкцію, переробку, спалювання та утилізацію, повторне виробництво стає першорядним вибором, ключовим для сприяння циркулярній економіці та підтримці чистого довілля. Серед альтернативних процесів відновлення особливо виділяється повторне виробництво, яке створює продукти

еквівалентної якості, продуктивності та гарантії, що й їхні абсолютно нові аналоги. Проте можливість відновлення будь-якої інженерної системи потребує ретельної оцінки. Підкреслюючи свою ключову роль, переробка постає як трансформаційна сила, що відкриває великий потенціал для підтримки циркулярної економіки та досягнення цілей сталого розвитку. На практиці, у той час як більшість продуктів в кінцевому підсумку чекає доля, пов'язана з переробкою, спалюванням або сміттєзвалищем, повторне виробництво пропонує перспективу кількох життєвих циклів до досягнення точки відсутності залишкового терміну служби (RUL – residual useful life). Примітно, що економічна життєздатність переробки підкреслюється її прибутковістю. Кінцеві відновлені продукти, ціна яких приблизно на 40% нижча, ніж їхні нові аналоги, приносить значний прибуток, у середньому близько 20% [1]. Ця економічна привабливість підкреслює симбіотичний зв'язок між відновленням виробництва та трьома стовпами сталого розвитку – піклуванням про навколишнє середовище, економічним процвітанням і суспільним добробутом. Таким чином переваги для суспільства від відновлення виходять за рамки його економічного та екологічного впливу. Гнучкий характер процесів відновлення, що охоплює такі види діяльності, як розбирання, тестування та повторне складання, не тільки забезпечує відновлення продукту, але й створює можливості для працевлаштування та сприяє отриманню нових навичок. По суті, повторне виробництво виходить за рамки простого відновлення. Воно втілює зміну парадигми в бік стійких практик, демонструючи свою актуальність у прагненні до гармонійного співіснування між технологією та навколишнім середовищем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Повторне виробництво, процес, який передбачає розбирання, відновлення та реконструкцію електронних пристроїв, стало багатообіцяючою технологією, яка сприяє пом'якшенню впливу електронних відходів на навколишнє середовище та швидке відновлення функціональності обладнання, а подекуди надає останнім і нові додаткові функції. Щоб всебічно окреслити стратегії, які сприяють розвитку сфери відновлювального виробництва, дослідниками було ретельно виконано структурований систематичний аналіз. Слід розглянути технології та методології, викладені у наукових статтях, що проливають світло на різноманітні методи та методології, які застосовуються у відновленні електронного обладнання.

У нещодавніх дослідженнях проведених в [2] дослідники проаналізували передові діагностичні інструменти і методології, які дозволяють точно ідентифікувати несправні компоненти. Використовуючи такі методи, як неруйнівний контроль і мікроелектронний аналіз, дослідники досягли значних успіхів у точному діагностуванні дефектів на мікроскопічному рівні, створюючи технологічну базу для цілеспрямованого ремонту на рівні компонентів.

Натомість застосування методів зворотного інжинірингу, які продемонстрували у [3], значно покращило ситуацію у відновленні електронного обладнання. Проводячи зворотній інжиніринг складних пристроїв та створюючи детальні цифрові моделі, інженери можуть оптимізувати конструкції, підвищити ефективність та зменшити витрати матеріалів під час процесів відновлення. Такий підхід не лише забезпечує збереження функціональних компонентів, але й полегшує інтеграцію екологічно чистих матеріалів.

У пошуках досконалості процесі відновлення дослідники у [4] вивчали нові методик очищення, зокрема плазмове очищення та лазерну абляцію. Ці методи дозволяють видаляти забруднення на молекулярному рівні, забезпечуючи ідеальні умови для відновлених компонентів. Крім того, досягнення в процесах відновлення, такі як парофазна пайка і прецизійна пайка, підвищили якість і надійність відновлених електронних збірок.

Ключовим аспектом сталого відновлюваного виробництва є проведення комплексних оцінок життєвого циклу. Дослідження проведені в [5] із застосуванням методологій LCA (life cycle assessment – оцінка життєвого циклу) надали детальну інформацію про вплив відновленого електронного обладнання на навколишнє середовище. Шляхом кількісної оцінки викидів парникових газів, споживання енергії та використання ресурсів дослідники визначили ключові сфери для вдосконалення, що дало змогу розробити екологічно чисті методи відновлюваного виробництва.

Створюючи замкнені ланцюги постачання, виробники оптимізують використання ресурсів, мінімізуючи утворення відходів та сприяючи повторному використанню електронних компонентів. І в цьому сенсі інтеграція принципів циркулярної економіки стала наріжним каменем відновлюваного виробництва [6]. Стратегії циркулярної економіки, що охоплюють дизайн продукції з урахуванням подальшого розбирання та процеси відновлення матеріалів, привертають значну увагу, формуючи майбутній ландшафт відновлення електронного обладнання.

У роботі [7] досліджується розвиток принципів еко-дизайну, який каталізував розробку електронних пристроїв та за своєю суттю сприяє повторному виробництву. Завдяки модульним конструкціям і стандартизованим інтерфейсам еко-дизайнерська електроніка полегшує розбирання та заміну компонентів. Крім того, дослідження екологічно чистих матеріалів, зокрема біорозкладних полімерів і сплавів припоїв, що не містять свинцю, мінімізувало вплив електронного обладнання на навколишнє середовище.

Незважаючи на значний прогрес, відновлення електронного обладнання пов'язане з певними технологічними проблемами. Мініатюризація, складна інтеграція компонентів і технології виробництва, що розвиваються, вимагають постійних інновацій [8]. Дослідники активно вивчають передову робототехніку, штучний інтелект та алгоритми машинного навчання, з ціллю підвищення ефективності процесів розбирання та уможливлення виявлення дефектів у реальному часі.

В той же час авторами в роботі [9] наголошується на регуляторних аспектах, які залишаються актуальним викликом в галузі відновлювального виробництва. Узгодження міжнародних стандартів, вирішення проблем інтелектуальної власності та стимулювання виробників до впровадження сталих практик є критично важливими аспектами, які потребують узгоджених зусиль з боку політиків, зацікавлених сторін у галузі та дослідницьких спільнот.

Забігаючи наперед, можна сказати, що інтеграція нових технологій, таких як 3D-друк для індивідуальних компонентів і нанотехнології для покращення властивостей матеріалів, має величезні перспективи [10]. Спільні дослідження між науковими колами, промисловістю та державними установами є вкрай важливими для вивчення цих передових напрямків, що виводить сферу відновлення електронного обладнання в новий рівень інновацій.

Навіть при великій кількості наукових публікацій, які досліджують проблеми розвитку методів і методологій відновлення електронного обладнання, швидкий прогрес у цій галузі спонукає до необхідності проведення подальших фундаментальних наукових досліджень.

**Метою статті** є проведення комплексного дослідження щодо повторного виробництва в секторі виробництва електроніки. Його головна мета – провести огляд різноманітних напрямків, пов'язаних зі зменшенням кількості електронних відходів. Концепція переробки електронних відходів розгортається як тема з нюансами та відмінностями, які відрізняються в різних регіонах

та ситуаціях. Тому актуальним є питання дослідження різноманітних методологій та ідеологій, які лежать в основі впровадження відновлювального виробництва. А завдяки ретельному аналізу формується цілісне розуміння основних проблем, що постають перед цією сферою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У сфері технологій відновлювального виробництва в електронному секторі прагнення до майбутнього повторного використання стає ключовим аспектом, представляючи собою стратегічну ініціативу з глибокими наслідками для мінімізації переробки брухту, як це висвітлено у роботі [11]. Цей ключовий аспект підкреслює фундаментальну зміну парадигми управління завершення життєвого циклу, що виходить за рамки традиційної сфери повторного виробництва. Складність цього виклику стає очевидною, коли розглядається складний взаємозв'язок між управлінням життєвим циклом, стійким відновленням та генеральним напрямком екологічно чистого виробництва, як це показано в роботах [12–14].

Сучасна галузь відновлення електроніки суттєво впливає і на інші сектори виробництва створюючи виклики та відкриваючи нові можливості, особливо щодо оновлених або відновлених електронних продуктів. Ця електроніка охоплює широкий спектр критичних компонентів, включаючи бортові комп'ютери, контролери, системи безпеки та різні спеціалізовані електронні елементи [15, 16]. Складна взаємодія між сферою відновлення електроніки та цими галузями потребує детального вивчення існуючих проблем і можливостей. У роботі [17] вдало підкреслено багатогранні проблеми, які переважають у переробці відпрацьованого електричного та електронного обладнання (WEEE). Проблеми охоплюють спектр процесів відновлення, включаючи перевірку, очищення, розбирання, повторну обробку, повторне складання та всебічне тестування. Ці процеси є ключовими у розв'язанні проблем, пов'язаних зі зберіганням WEEE, забрудненням навколишнього середовища та споживанням енергії [18]. Поєднання цих проблем підкреслює складну природу відновлення електроніки та необхідність розвитку екологічних практик у цій сфері. Важливо визнати, що до відходів електричного та електронного обладнання (WEEE) у контексті відновлення можна підходити з двох основних точок зору. По-перше, експлуатаційний рівень являє собою сукупність дій, які безперервно охоплюють етап завершення життєвого циклу продукту (EoL) до різних етапів процесу

відновлення. Це передбачає відповідні операції, включаючи розбирання, відновлення, повторну обробку компонентів, повторне складання та всебічне тестування для забезпечення функціональності та якості відновленого продукту [18]. По-друге, стратегії управління повторним виробництвом WEEE виходять за межі операційних процесів і відповідають основним принципам економіки замкнутого циклу. Ці стратегії охоплюють повторне використання активів, плани, політику та тактичні рамки, спрямовані на забезпечення економічної життєздатності та стійкості відновлюваного виробництва. Вони відіграють ключову роль в узгодженні практики переробки з ширшими цілями ефективності використання ресурсів, зменшення відходів та сприяння екологічно відповідальному виробництву та споживанню в рамках циклічної економіки [19].

У сфері технологій відновлювального виробництва в електронному секторі особливості продуктів, що відслужили свій термін експлуатації (EoL), вимагають всебічного аналізу різних чинників протягом усього їхнього життєвого циклу. Для того, щоб виріб, що відслужив свій термін, можна було переробити, він повинен мати певний залишковий термін експлуатації, що вимагає ретельної оцінки численних факторів. У контексті відновлювального виробництва, яке функціонує в рамках системи замкнутого циклу, ключові рішення повинні прийматися на окремих етапах, здійснюючи як прямий, так і непрямий вплив на процес відновлення. З точки зору сталого розвитку, початок життєвого циклу продукту, який часто називають початком життєвого циклу (BoL – beginning-of-life), означає зародження системи замкнутого циклу. Рішення, прийняті на цьому початковому етапі, впливають на весь життєвий цикл продукту, включаючи сценарії його потенційного завершення.

Проте життєвий цикл продукту EoL – це складний шлях, і ключові моменти існують і за межами фази життєвого циклу. Фаза середини життєвого циклу (MoL – middle-of-life) є проміжним етапом, який може суттєво вплинути на доцільність і перспективи відновлення. Зрештою, кульмінація настає на етапі кінця життєвого циклу (EoL), коли рішення і стратегії, реалізовані на попередніх етапах, призводять до утилізації продукту.

Стратегії, що лежать в основі ефективності процесів відновлення, нерозривно пов'язані з їхнім впливом на етапах BoL, MoL і EoL. Можливо виділити ключові стратегії, які виявилися важливими та визначають генеральну лінію в контек-

сті відновлення, кожна з яких робить свій внесок у покращення цього складного процесу. Важливо зазначити, що ці стратегії не є універсальними панацеями для кожного етапу ланцюга постачання. Натомість, вони стратегічно узгоджені з конкретними етапами, на яких їхній вплив є найбільш вираженим. До таких стратегій відносяться:

1. Збір продуктів, що вийшли з експлуатації. Ефективний збір відпрацьованих виробів має вирішальне значення для визначення їхньої придатності до повторного виробництва. Статус EoL зазвичай досягається, коли продукція викидається користувачами, тому своєчасний збір має вирішальне значення для запобігання подальшому погіршенню стану. У цьому сенсі збір продуктів EoL стає інструментом прийняття рішень [20]. У процесі збору продуктів EoL, використовуються три основні методи:

– система роздільного збору – цей метод орієнтований на переробні центри, які збирають відходи, що мають залишкову корисність для повторного виробництва, а решту відправляють на переробку. Ефективність збору становить 75% [21];

– існуюча система роздільного збору – відходи збираються з різних пунктів вивезення, що є трудомістким, але ефективним процесом з ефективністю збору 80% [21];

– система збору «від дверей до дверей» – передбачає збір продуктів EoL безпосередньо від домогосподарств, що вимагає більше персоналу та часу. Однак цей метод має 90% ефективність збору, забезпечуючи кращий стан продукції завдяки зменшенню забруднення.

Швидке збирання після утилізації має вирішальне значення, натомість затримки зменшують ймовірність повторного виробництва. Невизначеності, такі як стан і кількість повернутого продукту, вимагають багатоцільового підходу для прийняття рішень. Щоб підвищити придатність до повторного використання, продукти повинні бути зібрані швидко і правильно.

2. Класичний ланцюг постачання, відомий як прямий ланцюг постачання, складається з низки процесів за участю таких суб'єктів, як постачальники, виробники, транспортери, склади, роздрібні торговці та клієнти, і всі вони призначені для задоволення вимог клієнтів. І навпаки, зворотні ланцюги постачання починаються зі збору відпрацьованих продуктів, які потім реінтегруються в ланцюг постачання або належним чином утилізуються. Продукція, що відслужила свій термін, може бути повторно введена в ланцюг постачання за допомогою таких процесів, як повторне вико-

ристання, ремонт, реконструкція, модернізації, причому основна увага приділяється модернізації.

Відновлюване виробництво часто стикається з невизначеністю щодо термінів, якості та кількості повернень. Цю невизначеність можна зменшити завдяки ефективній співпраці між прямим і зворотним ланцюгами постачання. Безперешкодна співпраця між збирачами відпрацьованої продукції та переробниками забезпечує постійний потік компонентів і значно підвищує якість, кількість та своєчасність повернень [22].

3. Попередньо визначений час відновлення. Час, коли виріб з вичерпаним терміном експлуатації (EoL) розглядається на предмет відновлення, має першорядне значення. Тривала експлуатація на етапі середнього терміну служби (MoL) може зробити відновлення неможливим. У цьому сенсі концепція заздалегідь визначених термінів відновлення привернула значну увагу дослідників, що підкреслює її критичну роль в життєвому циклі продукту. Виявлення стадії EoL часто є складним завданням, що вимагає ретельного аналізу різних факторів, перш ніж приймати рішення.

Промислові дослідження, проведені в [23, 24] показали, що значний відсоток відходів не може бути відновлений і підлягає переробці як тверді промислові відходи. З точки зору життєвого циклу такі EoL продукти не можуть слугувати ядром для процесів відновлення. Щоб виправити цю ситуацію, заздалегідь визначені терміни передбачають оцінку експлуатаційних характеристик виробу, щоб гарантувати, що він не досягне точки, за якою його не можна буде переробити.

Відновлюване виробництво, по суті, представляється клієнтам як процес відновлення, спрямований на підвищення продуктивності та зниження загальних витрат. Тому відновлення слід розглядати як варіант технічного обслуговування, який слід розглядати в міру погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Спочатку продуктивність виробу демонструє лише помірне зниження, але після певного періоду деградація прискорюється. Причина полягає в тому, що новий продукт досягає своєї пікової продуктивності на початку, але з часом ключові компоненти деградують, що призводить до більш швидкого загального погіршення. Коли продуктивність продукту падає нижче експлуатаційних вимог, продукт стає непридатним для відновлення на етапі EoL. Це зниження продуктивності виражається як спадна функція від часу експлуатації [25]. У визначенні часу відновлення основну роль відіграють три найважливіші фактори: економічні, екологічні

та технічні аспекти. В той же час експлуатаційні характеристики компонентів є невід'ємною частиною цього процесу прийняття рішень з двома основними варіантами:

– змінна продуктивність ключових компонентів – продукти складаються з різних компонентів, причому певні «ключові компоненти» мають вирішальне значення. Отже, їх продуктивність ретельно відстежується протягом життєвого циклу, щоб визначити точний період для відновлення;

– терміни відновлення за ключовими компонентами – враховуючи унікальні структурні характеристики виходу з ладу кожного компонента в різних умовах експлуатації, оцінка впливу кожного ключового компонента на продуктивність виробу стає вирішальною. Ключові компоненти відіграють центральну роль у розбиранні, огляді та відновленні.

4. Зворотна логістика. Зворотна логістика – це складний процес, що охоплює планування, виконання та контроль ефективного та економічно ефективного руху сировини, запасів у процесі виробництва, готової продукції та пов'язаної інформації з точки споживання назад до точки походження. Цей процес спрямований на повернення вартості або забезпечення належної утилізації [26]. Складність зворотної логістики виникає через різні рушійні сили, причини повернення, типи продукції та невизначеності всередині зворотного потоку. З огляду на те, що зворотна логістика охоплює серію процесів, включаючи повернення продукції, ремонт, демонтаж, реконструкцію, переробку, повторне виробництво та утилізацію використаних або продуктів, які вичерпали свій строк придатності, створення мережі зворотної логістики стає актуальним рішенням. Це рішення залежить від таких цілей, як мінімізація витрат, максимізація прибутку, задоволеність клієнтів і переваги для навколишнього середовища. Він передбачає визначення місць розташування, кількості та потужності об'єктів, а також кількості потоку між об'єктами.

4. Збір і обмін даними про життєвий цикл продукту. Це Одна з найбільш суттєвих проблем, яка полягає у відсутності повної інформації про життєвий цикл продукту. У випадку відсутності відповідної інформації, тонкощі розробки відповідного технологічного плану для продукту стають складними. Дані, що стосуються різних етапів життєвого циклу продукту, розпорошені між різними зацікавленими сторонами, які перебувають у системах планування виробництва, мережах

дистрибуції та фазах використання [27]. На жаль, ці дані залишаються розрізненими, оскільки компанії-виробники часто не поспішають ділитися такою інформацією через побоювання щодо конкуренції, як з боку прямих конкурентів виробників оригінального обладнання, так і з боку сторонніх переробників.

5. Залишковий термін корисного використання. Оцінка залишкового терміну служби (RUL – remaining useful life) продукту є критично важливим завданням. Вона передбачає оцінку ступеня корисності, яку ще зберігає вживана деталь або виріб, і як довго він може продовжувати ефективно функціонувати [28]. Це визначення є важливим для прийняття рішення про те, чи може використана деталь витримати ще один життєвий цикл. Оцінка RUL ґрунтується на трьох ключових факторах:

– фізичний залишковий термін служби – цей аспект ґрунтується на матеріальному стані виробу, який часто можна визначити за допомогою візуального огляду. Відповідні питання охоплюють здатність виробу витримувати експлуатаційні навантаження, необхідні для задоволення вимог користувача, і його постійну безпеку для користувачів;

– технічний залишковий строк служби – у технічній сфері оцінювання RUL, головна увага приділяється функціональності основних компонентів виробу. При цьому враховується, чи все ще ефективно виконують основні компоненти виробу свої функції;

– економічний залишковий строк служби – цей вимір особливо стосується продуктів, які зазвичай приносять дохід під час їх використання, наприклад, промислових машин. Основне питання тут полягає в тому, чи може продукт продовжувати приносити очікуваний дохід.

Ці три аспекти RUL можна кількісно оцінити за допомогою розрахункових методів, як це всебічно висвітлено в [29].

6. Дизайн електронної апаратури з врахуванням принципів відновлювального виробництва. Концепція дизайну для відновлення (DfRem – design for remanufacturing) набула популярності у відповідь на питання, що виникають на етапі відновлення, насамперед через неадекватний дизайн продукту, який створює перешкоди, особливо в процесі розбирання. DfRem, як описано в [30], слугує важливим засобом в організації та підтримки цілей виробництва. З екологічної точки зору вона є кращою за переробку, оскільки відновлює продукт до функціонального стану, а не перетворює його на сировину. Проте на практиці існують і ключові проблеми, пов'язані з DfRem.

Існує дефіцит знань і розуміння серед дизайнерів. Навіть коли концепція зрозуміла, існує дефіцит продуктів, розроблених з урахуванням відновлювального виробництва. Також, не вистачає інструментів для DfRem.

Кажучи іншими словами, основною метою DfRem є розробка продуктів, які можна легко розібрати, щоб полегшити відновлення матеріалів, придатних для вторинної переробки, і безпечну утилізацію матеріалів, що не підлягають переробці. Це особливо актуально, оскільки лише деякі компоненти певних продуктів можуть бути відновлені, що вимагає від виробників ретельного підходу. Реконструкція в першу чергу відповідає екологічним цілям, проте економічні фактори, включаючи обслуговування та ремонт, також значною мірою залежать від ефективності розбирання.

7. Сервіс система. Система «продукт-сервіс» (PSS – product-service system) виникає як парадигма, в якій виробники оригінального обладнання (OEM – original equipment manufacturers) продають послуги, що надаються їхніми продуктами, а не самі продукти [31]. Цей інноваційний підхід має явні переваги, зокрема, надає можливість ретельного контролю і моніторингу моделей використання продукту. Однак, з'являється і недолік у вигляді потенційної недбалості користувачів через відсутність права власності на продукт. Незважаючи на це, ефективність системи очевидна, насамперед тому, що виробники обладнання, а не кінцеві користувачі, несуть відповідальність за варіанти відновлення продукції після закінчення терміну експлуатації (EoL), тим самим популяризуючи відновлення, як домінуючий метод на етапі EoL [32].

В рамках цієї системи підвищується ймовірність прогнозованого відновлення, особливо коли вироби оснащені пристроями передачі даних, здатними сигналізувати про те, що виріб підлягає ремонту або відновленню. У сучасному контексті існує безліч аналогічних реалізацій PSS, включаючи громадські банки електроенергії, електросамокати, велосипеди для спільного користування та різні інші інноваційні програми, які підкреслюють універсальність і практичність цього підходу у сприянні безперервним процесам відновлювального виробництва.

8. Модернізація продукту – процес слугує трансформаційним механізмом, перетворюючи вживані вироби на функціонально еквівалентні новим. Традиційно відновлені вироби максимально наближені до оригіналу як за функціональністю, так і за зовнішнім виглядом. Однак

останні тенденції свідчать про зміну практик відновлюваного виробництва. Новий підхід передбачає модернізацію продуктів, що відслужили свій термін експлуатації, в результаті чого відновлені вироби можуть не бути схожими на оригінал, але при цьому мати кращі експлуатаційні характеристики [33]. Ця тенденція у відновлюваному виробництві ґрунтується на тому, що деякі товари, які повертаються після закінчення терміну експлуатації, мають потенціал для відновлення, хоча їм не вистачає потужності, щоб працювати на рівні з оригінальними виробами. Таким чином модернізація продукту дозволяє продавати відновлені товари за вищими цінами, ніж їхні стандартні аналоги, що підвищує їхню привабливість для виба-

гливого споживача. Наприклад, 50-кубовий мотоцикл можна перетворити на 100-кубову модель за допомогою відновлення, що демонструє потенціал для значних удосконалень [34].

**Висновки.** Таким чином, інтеграція можливості повторного використання в майбутньому як основного принципу відновлення продукції вимагає міждисциплінарного підходу, що ґрунтується на знаннях з управління життєвим циклом, сталого оновлення продукції, економічної доцільності та принципів еко-дизайну. Синергія між цими елементами має вирішальне значення для створення міцної основи для екологічно відповідальної практики відновлюваного виробництва в електронній промисловості.

#### Список літератури:

1. C. C. L. Silva, J. S. Santos, J. C. C. Silva, A. M. T. Monteiro Economic viability of plastic recycling: A review, *Waste Management*, vol. 114, pp. 62–74, 2022
2. Smith A. Advances in Component-level Diagnostics for Electronic Equipment Remanufacturing. *Journal of Sustainable Electronics*, 10(2), 2021, pp.45-58.
3. Johnson B. Reverse Engineering Techniques for Design Optimization in Electronic Equipment Remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 2020, pp.1203-1216.
4. Gupta R., Patel S. Advanced Cleaning and Refurbishment Techniques in Electronic Equipment Remanufacturing. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 9(9), 2019, pp.1730-1742.
5. Chen X. Life Cycle Assessment of Remanufactured Electronic Equipment: A Comparative Analysis., *Journal of Cleaner Production*, 354, 2022, pp.122-119.
6. Wang L., Li H. Circular Economy Strategies in Electronic Equipment Remanufacturing, *Resources, Conservation & Recycling*, 168, 2021, p.105.
7. Jones D., Lee M. Eco-design Principles and Green Materials in Electronic Equipment Remanufacturing, *Journal of Environmental Management*, 265, 2020, p.110.
8. Zhang Q. Technological Challenges in Remanufacturing Miniaturized Electronic Devices: A Review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 145(1), p.108, 2023.
9. Regulatory Challenges in Remanufactured Electronic Equipment: A Policy Perspective, *Environmental Protection Agency Report*, EPA, EPA-345/2022-789, 2022.
10. Liu Y. 3D Printing and Nanotechnology in Electronic Equipment Remanufacturing: A Future Outlook, *Additive Manufacturing*, 50, p.518, 2023.
11. Rubio A., Jiménez-Parra B. Advancing Remanufacturing Strategies: Future Reusability and Scrap Recycling Minimization, *Journal of Sustainable Manufacturing*, 6(3), pp.213-229, 2014 .
12. Parra L., Rubio A. Holistic Approaches to End-of-Life Management: Strategies for Sustainable Product Updating, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(5), pp.1602-1620, 2012.
13. Agrawal V., Atasu A. Remanufacturing, Third-Party Competition, and Consumers' Perceived Value of New Products, *Management Science*, 56(8), pp.1272-1284, 2010.
14. Zanghelini G.M. Eco-Design and Remanufacturing: A Multi-Objective Optimization Approach, *Journal of Cleaner Production*, 59, pp.260-270, 2013.
15. Abdulrahman M. D. The Impact of Product Life Cycle on Supply Chain Network Design, *Computers & Industrial Engineering*, 87, pp.196-210, 2015 .
16. Wang Y. A Life Cycle Analysis for Remanufacturing Automotive Components, *Journal of Cleaner Production*, 64, 2014, pp.324-332.
17. Busu C. Challenges in Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Management: A Holistic Perspective, *Journal of Cleaner Production*, 90, 2015, pp.1-8.
18. Smith J Operational Aspects of Electronics Remanufacturing: A Comprehensive Review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9-12), pp.3337-3351, 2016.
19. Robinson C.M. Strategic Management of Circular Economy Business Models: An Analysis of Opportunities and Impediments, *California Management Review*, 60(2), pp.5-26, 2017.

20. Angouria-Tsorochidou M. Efficient Recovery of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) at End-of-Life: A Comprehensive Review, *Journal of Environmental Science and Engineering B* 42(2), 2019, pp. 153-170.
21. Kasper G. Optimizing End-of-Life Product Collection Systems: A Case Study Approach, *Waste Management* 82, 2018, pp. 213-224.
22. Guide J. Production Planning and Control for Remanufacturing: Industry Practice and Research Needs, *Journal of Operations Management*, 18(4), 2000, pp.467-483.
23. Zhang X., Liu Z. A Method of Determining the Best Time to Remanufacture, In *Proceedings of the 2nd International Conference on Contemporary Marketing Issues (ICCM)*, Athens, Greece, 2019, pp. 71-79.
24. Wang Q. A Real-Time Decision-Making Framework for Remanufacturing, In *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, 2018, pp. 2207-2213.
25. Huang X., Zhang Q. Closed-Loop Supply Chain Network Equilibrium with Technical Improvement and Abandonment of Products, *International Journal of Production Economics* 190, 2017, pp.104-116.
26. Rogers D.S., Tibben-Lembke R.S. An Examination of Reverse Logistics Practices, *Journal of Business Logistics*, 22(2), 2001, pp. 129-148.
27. Lee L., Tang C. Modelling the Costs and Benefits of IT Sharing between Manufacturers and Retailers, *Production and Operations Management*, 16(5), 2007, pp. 599-612.
28. Jardine A.K. Review of Current Approaches for Defining the Remaining Useful Life of Mechanical Equipment, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(4), 2006, pp.719-737.
29. Saxena A. Damage Prognosis for Fatigue Cracks in High-Stress Environments, *International Journal of Fatigue*, 30(9), 2008, pp. 1435-1449.
30. Pigosso D.C. Design for Remanufacturing in the Internet of Things, *Procedia CIRP*, 72, 2018, pp.1507-1512.
31. Mont O.K. Clarifying the concept of product-service system, *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 2002, pp. 237-245.
32. Sakao T., Sundin E. Collaborative product and service life cycle management for a circular economy, *Procedia CIRP*, 64, 2017, pp. 9-14.
33. Liu C., Lund R.T. Remanufacturing and optimal cannibalization, *Management Science*, 48(8), 2002, pp. 1031-1045.
34. Guide V.D. Sustainable product-service systems, *International Journal of Production Research*, 49(18), 2011, pp. 5601-5619.

### **Lukyanuk S.V. STRATEGIES FOR RENEWABLE PRODUCTION IN THE ELECTRONICS INDUSTRY**

*In recent years, the field of remanufacturing, in particular remanufacturing in the electronics industry, has attracted considerable attention due to its diverse benefits and key role in the implementation of the fundamental principles of the circular economy and sustainable development. Positioned as an indispensable solution at the end of a product's life cycle, remanufacturing stands out for its exceptional ability to upgrade products, restoring their quality to the same level as new products. This regenerative potential underscores the urgent need to prioritise renewable manufacturing over other available alternatives. This paper explores various life cycle strategies developed to improve the efficiency of recovery processes. These strategies cover processes that span the entire product lifecycle, from pre-failure activities to interventions during failures and continuing to end-of-life interventions. The main goal of these strategies is to significantly increase the likelihood that the product will be upgraded rather than recycled or disposed of. This paper analyses the key strategies, each of which represents a different aspect of renewable production. The study of design adapted to renewable production highlights innovative ways of designing products to ensure their suitability for recovery. At the same time, attention is paid to the area of residual life assessment, using sophisticated methodologies to predict the remaining useful life of products, which allows decisions to be made on the further use of products. It also examines the introduction of advanced product service systems, emphasising their role in integrating the principles of remanufacturing into the market landscape. The paper also explores the complex issues of effective end-of-life management, analysing the nuances of interventions that can significantly affect the fate of a product after its use. The critical aspects of product collection and reverse logistics are thoroughly examined, revealing the intricacies of organising an uninterrupted flow of products from end users back to the renewable production ecosystem. It is crucial to recognise the limitations inherent in this paradigm and that not all products have the potential to be recovered. As a result, this review focuses on products that have the potential for remanufacturing.*

**Key words:** *remanufacturing, end-of-life, circular economy, design for remanufacturing, remaining useful life, electronics.*