

## НОВІ РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ І ТОРГІВЛІ

УДК 658.589

DOI <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-2-5>

### ЦІННІСТЬ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ У ГАЛУЗІ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОНІКИ

С. В. ЛУК'ЯНЮК, старший науковий співробітник  
(Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки  
та судових експертиз Служби безпеки України)

**Анотація.** *Останніми роками сфера циркулярної економіки, зокрема відновлювальне виробництво у галузі електроніки, привертає до себе значну увагу завдяки своїм різноманітним перевагам і ключовій ролі у реалізації фундаментальних принципів збереження цінності. Це пов'язано з тривожними темпами використання природних ресурсів і, як наслідок, з ризиком дефіциту деяких ресурсів, а також з екологічними, соціальними та економічними змінами в економіці. Перехід від лінійної економіки, де продукти після використання викидаються, до циркулярної, де продукти і матеріали залишаються в системі якомога довше, сприятиме більш сталому майбутньому. Це інновації у виробництві та споживанні. Інновації, де ми відходимо від ресурсоемних моделей виробництва та споживання до ефективних процесів, де інновації стануть рушієм змін, що має важливе значення для досягнення цілей сталого розвитку. Стрімкий розвиток технологій у сучасній електронній промисловості та зростання попиту на нові пристрої супроводжується значними обсягами електронних відходів, що негативно впливає на екологію та споживання природних ресурсів. У відповідь на ці виклики, все більшу увагу привертають стратегії збереження цінності (VRP – Value-Retention Processes), які є ключовими елементами циклічної економіки. У цій роботі розглядаються шляхи впровадження VRP у виробництво електроніки, що передбачає оптимізацію процесів на всіх етапах життєвого циклу продукту, починаючи від видобутку сировини і завершуючи її утилізацією. Впровадження VRP у галузі електроніки має потенціал суттєво скоротити обсяги відходів і зменшити негативний вплив на довкілля. Це досягається завдяки подовженню життєвого циклу продуктів, повторному використанню компонентів та матеріалів, а також впровадженню більш ефективних методів переробки. Проте, ефективність реалізації VRP значною мірою залежить від специфіки галузі та конкретних умов застосування. З іншого боку, в інших сегментах, таких як побутова електроніка, де цикли оновлення продукції менш інтенсивні, VRP може бути впроваджено з меншими витратами і швидше. Серед переваг VRP слід зазначити не тільки зниження витрат на матеріали та зменшення залежності від первинних ресурсів, але й можливість створення нових бізнес-моделей, що базуються на обслуговуванні та повторному використанні продукції. Проте, недоліками можуть бути складність інтеграції цих процесів у вже існуючі виробничі ланцюги, а також потреба у значних змінах у структурі бізнесу та навчанні персоналу.*

**Ключові слова:** *відновлюване виробництво, циркулярна економіка, стратегії збереження цінності, дизайн для відновлюваного виробництва, життєвий цикл продукції, електроніка.*

**Постановка проблеми.** У рамках циркулярної економіки, сектор виробництва електронних пристроїв впроваджує системний підхід до управління ресурсами. Ця модель передбачає створення замкнутих виробничих циклів, де вихідні продукти кожного етапу інтегруються як вхідні матеріали для подальших процесів. Така стратегія забезпечує редукацію попиту на первинну сировину, оптимізацію енергоспоживання та значне скорочення обсягів відходів. У контексті виробництва електронних пристроїв циркулярна економіка стає важливою системною основою для протидії неефективності традиційних лінійних моделей споживання, які часто призводять до значних матеріальних втрат, зниження функціональності та знецінення ресурсів, закладених

у продуктах. Однак реалізація повної циркулярності в секторі електроніки потребує радикального переосмислення традиційних лінійних моделей «виробництво-споживання-утилізація» [1]. Необхідний перехід до системного підходу, що передбачає інтеграцію принципів циркулярності на всіх етапах життєвого циклу продукту – від видобутку сировини до кінцевого утилізації. Це передбачає наступні етапи:

– редизайну виробів – застосування концепції модульності при створенні електронних пристроїв для мінімізації відходів та максимізації утилізації компонентів, з використанням довговічних матеріалів та стандартних інтерфейсів для полегшення ремонту та повторного використання компонентів;

– оптимізації виробничих процесів – впровадження технологій замкнутого циклу, мінімізація відходів та енергоспоживання, використання відновлюваних джерел енергії;

– розвитку інфраструктури збору та переробки – впровадження високоефективних механізмів акумуляції відпрацьованої електроніки, розвиток прецизійних технологій екстракції ресурсоцінних елементів та їх подальша рециркуляція в контексті замкнутого виробничого циклу;

– зміни поведінки споживачів – стимулювання довготривалого використання електроніки, просування культури ремонту та оновлення, а не постійної заміни пристроїв.

Циркулярна економіка націлена на декореляцію економічного зростання від екологічного впливу шляхом максимального продовження життєвого циклу матеріалів. Впровадження стратегій збереження цінності (VRP – Value-Retention Processes) в електроніці передбачає оптимізацію процесів від видобутку сировини до утилізації. Ключовими VRP для електронних пристроїв є модульний дизайн, що полегшує ремонт та заміну компонентів, а також розвиток ефективних систем збору та сортування відходів електроніки для подальшої переробки.

Ефективність реалізації стратегій відновлювального виробництва (VRP) значно варіюється залежно від специфіки галузі та конкретних застосувань. Хоча у багатьох секторах, особливо в електроніці, VRP демонструють значний потенціал для зменшення екологічного сліду та оптимізації економічних показників, їхній вплив залишається неоднорідним. Зокрема, відновлювальне виробництво, незважаючи на безумовні переваги, досі не досягло масштабів, необхідних для суттєвого переходу до циркулярної економіки. За даними Комісії з міжнародної торгівлі США (2012) [2] та Європейської мережі відновлюваного виробництва (2015) [3], частка відновлених продуктів у загальному обсязі виробництва в США та ЄС становить лише близько 2% та 1,9% відповідно. Це свідчить про необхідність подальших досліджень та розробки цільових стратегій для стимулювання впровадження VRP в різних секторах економіки.

Ключовою проблемою є перехід від пілотних проектів з впровадження VRP до масштабного застосування цих практик у виробничих ланцюжках. Це вимагає розробки ефективних механізмів масштабування, включаючи стандартизацію процесів, створення інструментів оцінки ефективності та розповсюдження кращих практик.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Концепція циркулярної економіки дедалі більше визнається як важлива основа для досягнення сталого економічного зростання з одночасною мінімізацією впливу на довкілля. Як зазначається

у роботі [4], такий підхід має на меті відокремити економічне зростання від ескалації тиску на навколишнє середовище. Реалізація такої концепції досягається шляхом створення регенеративних систем, які мінімізують споживання ресурсів, утворення відходів, викиди та витоки енергії. У дослідженні [1] детально розглядається концепція циркулярної економіки, яка визначається як система, що функціонує через оптимізацію, уповільнення та замикання циклів матеріальних і енергетичних ресурсів. За останніми даними, циркулярна економіка не лише зменшує відходи, але й сприяє стійкому розвитку, знижуючи викиди вуглецю та використання первинних матеріалів. Зокрема, дослідження показують, що впровадження інноваційних технологій у виробництві та переробці може підвищити ефективність використання ресурсів на 30% до 2030 року [5].

«Звуження петель» передбачає зменшення споживання ресурсів за рахунок підвищення ефективності, що забезпечує використання меншої кількості ресурсів для отримання тієї ж або більшої цінності. В свою чергу «уповільнення циклів» подовжує термін служби компонентів, деталей і матеріалів за рахунок підвищення їхньої міцності та уможливлення багаторазових циклів використання. Цей підхід особливо актуальний у секторі виробництва електронних пристроїв, де швидке старіння і часта модернізація призводять до значного виснаження ресурсів і утворення відходів. Також передбачено елементи «замкнення циклів», що дає можливість фокусуватися на переробці матеріалів з метою повторного введення їх у виробничий процес, тим самим зменшуючи потребу в новій сировині та пом'якшуючи деградацію навколишнього середовища [6].

Згідно з дослідженнями у роботі [7], застосування принципів циркулярної економіки у виробництві смартфонів може призвести до зниження вуглецевого сліду на 40–50% протягом всього життєвого циклу продукту. Це досягається за рахунок оптимізації процесів виробництва, використання вторинних матеріалів та впровадження ефективних систем збору та переробки електронних відходів. Крім того, розробка модульних конструкцій електронних пристроїв дозволяє подовжити термін їх експлуатації на 30–40%, що суттєво знижує загальне споживання ресурсів.

Для ефективного впровадження принципів циркулярної економіки в промисловості особливо увагу слід приділяти реалізації процесів збереження цінності (VRP). Згідно з останніми дослідженнями [8–10], VRP відіграють ключову роль у забезпеченні циклічності використання ресурсів, що, у свою чергу, сприяє розвитку стійких промислових практик. До цих процесів належать різні стратегії, включаючи оптимізацію споживання ресурсів, ремонт продукції з метою

подовження її життєвого циклу, повторне використання компонентів та переробку матеріалів для їх повторного залучення у виробництво.

У контексті виробництва електронних пристроїв впровадження VRP є особливо важливим. Швидкі темпи технологічного прогресу в цьому секторі часто призводять до скорочення життєвого циклу продукції, що, в свою чергу, призводить до збільшення кількості відходів і виснаження ресурсів. Впроваджуючи VRP на етапах проектування та виробництва, виробники можуть не лише подовжити термін служби своєї продукції, але й зменшити вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з видобутком сировини та утилізацією електронних відходів.

Крім того, останні досягнення в галузі цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT) і блокчейн, надають нові можливості для підвищення ефективності VRP. Пристрої з підтримкою Інтернету речей можуть бути розроблені з урахуванням модульності, що полегшує ремонт і модернізацію, тоді як блокчейн може полегшити відстеження матеріалів по всьому ланцюгу постачання, забезпечуючи їх ефективну переробку або повторне використання в кінці їхнього терміну служби. Завдяки технологічним інноваціям стає можливим більш надійне та масштабоване інтегрування принципів циркулярної економіки у виробництво електронних пристроїв. Останні наукові досягнення свідчать про те, що такі підходи сприяють не лише зниженню екологічного навантаження, але й покращують економічну ефективність виробничих процесів шляхом зниження витрат на сировину та підвищення рівня повторного використання матеріалів.

**Формування цілей статті.** Метою даної статті є дослідження ролі процесів збереження вартості (VRP) у розвитку циклічної економіки, зокрема в галузі виробництва електроніки. Основна задача полягає у проведенні огляду та аналізу підходів, спрямованих на зменшення обсягів електронних відходів. Концепція переробки електронних відходів потребує врахування регіональних та ситуаційних нюансів, що потребує глибокого дослідження та адаптації підходів. З цієї причини необхідним є глибоке вивчення різних методологій та ідеологій, які є основою для успішного впровадження відновлювального виробництва. Ретельний аналіз дозволяє отримати цілісне уявлення про основні проблеми, що постають перед цією сферою, та знайти шляхи їх вирішення задля підвищення ефективності виробництва електронних пристроїв.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процеси збереження вартості (VRP) відіграють центральну роль у переході до циркулярної економіки. Вони дозволяють максимізувати цінність матеріалів та продуктів протягом всього їхнього

життєвого циклу. У контексті виробництва електронних пристроїв, VRP може виявлятися у продовженні терміну служби пристроїв завдяки ремонту, модернізації та повторному використанню компонентів, але й до створення економічних можливостей за рахунок скорочення витрат і створення нових можливостей для працевлаштування.

Серед різних VRP повторне виробництво та комплексне оновлення виділяються як процеси, які можуть відновити продукти до стану, який забезпечує повний або майже повний термін служби, порівнянний з новими продуктами. Ці процеси є особливо ефективними для пом'якшення значних екологічних та економічних витрат, які зазвичай пов'язані з традиційним виробництвом, таких як видобуток ресурсів, споживання енергії та утворення відходів. На додаток до цих високоефективних VRP, такі практики, як пряме повторне використання, ремонт і стандартне оновлення, надають споживачам доступні варіанти для розширення зручності використання їхніх електронних пристроїв. Наприклад, послуги з ремонту можуть вирішувати конкретні проблеми, які можуть виникнути протягом терміну служби продукту, тим самим запобігаючи необхідності повної заміни. Подібним чином пряме повторне використання передбачає продовження використання продуктів без суттєвих модифікацій, збереження їх функціональної цінності та відстрочення потреби у новому виробництві. Зокрема, сектор відновлення електроніки створює нові бізнес-моделі, засновані на повторному використанні матеріалів та компонентів. Це веде до зниження витрат на сировину та енергію, а також підвищує конкурентоспроможність підприємств. Глибоке дослідження сектору електроніки виявляє значний потенціал відновлення цінності (VRP) у порівнянні з традиційними моделями виробництва. Таким чином, VRP є потужним інструментом для переходу до більш сталого та стійкого виробництва електроніки.

Дотримуючись принципів VRP доречно акцентувати увагу на тому, що дизайн продукту також є важливим фактором для визначення як виробничих витрат, так і екологічного та соціального впливу протягом усього життєвого циклу. Поточні оцінки свідчать, що до 75% виробничих витрат і 80% впливу на навколишнє середовище продиктовані початковими дизайнерськими рішеннями [11]. Отже аби вийти за межі поступового впровадження циркулярних принципів у виробництві електроніки, необхідно зосередитися на комплексних стратегіях, спрямованих на радикальну мінімізацію відходів та максимальне збереження цінності ресурсів протягом усього життєвого циклу продукту.

Слід погодитися з тим, що перехід до циркулярної економіки в електроніці вимагає

радикальної трансформації підходів до проектування продукції та систем. Ця трансформація передбачає перехід від лінійної моделі "виробок-виробництво-споживання-утилізація" до замкнутих циклів, де матеріали та продукти постійно циркулюють. Як приклад, сюди можна віднести мінімізацію використання шкідливих речовин, модульну конструкцію, яка полегшує розбирання та повторне використання компонентів, а також біосумісні матеріали. Такі нововведення ґрунтуються на трьох основних вимогах: створення цінності, захист і збереження цієї цінності та ефективне відновлення цінності після закінчення використання або терміну служби продукту. Зосередження на циркулярних принципах у дизайні електронних пристроїв може суттєво підвищити ефективність використання ресурсів. Наприклад, впровадження модульного дизайну дозволяє легко замінювати окремі компоненти, що подовжує термін служби продукту та зменшує кількість електронних відходів. Дослідження, проведені в 2023 році, показали, що використання модульних систем може зменшити обсяги відходів до 50% у порівнянні з традиційними підходами [12, 13]. Можна констатувати той факт, що у контексті циркулярної економіки та відновлювального виробництва, імплементація концепції VRP у сфері електроніки передбачає комплексний підхід до оптимізації життєвого циклу продукції. Цей підхід охоплює наступні ключові аспекти:

1. екологічно орієнтоване проектування – розробка електронних пристроїв з урахуванням принципів циркулярності, що забезпечує їх легке демонтування, ремонтпридатність та можливість оновлення [14];

2. модульна архітектура – застосування модульних конструкцій сприяє спрощенню процесів технічного обслуговування, ремонту та модернізації, що подовжує термін експлуатації пристроїв та мінімізує відходи [15];

3. підвищення довговічності – фокус на створенні довготривалих продуктів зменшує потребу в частій заміні обладнання, що сприяє зниженню екологічного навантаження [16];

4. раціоналізація використання ресурсів – впровадження стратегій мінімізації застосування дефіцитних та потенційно небезпечних матеріалів, а також розробка ефективних систем збору та рециклінгу електронних відходів [17].

5. колаборативний підхід – формування інтегрованих екосистем, де всі учасники ланцюга створення вартості, від виробників до споживачів та переробників, взаємодіють для досягнення спільних цілей циркулярності [1];

Нещодавні наукові дослідження вказують на те, що впровадження процесів збереження вартості (VRP) у виробництво електроніки здатне зменшити споживання первинних ресурсів на 80–99%

та суттєво скоротити викиди парникових газів на 79–99% у порівнянні з традиційними лінійними моделями виробництва [9]. Додатково, реалізація принципів циркулярної економіки в електронній промисловості може потенційно призвести до створення економічної цінності, яка досягне 4,5 трильйонів доларів США до 2030 року [18]. Крім того, важливо відзначити, що інноваційні технології, такі як 3D-друк і сучасні методи рециклінгу, відіграють ключову роль у реалізації VRP. Наприклад, застосування технологій 3D-друку дозволяє виготовляти запасні частини на вимогу, що значно зменшує потребу в зберіганні великих обсягів запасів і мінімізує утворення відходів [19]. Сучасні дослідження свідчать про те, що впровадження VRP може забезпечити досягнення замкнутого циклу матеріалів у електронній промисловості, що дозволить досягти понад 90% повторного використання ресурсів. Це позитивно вплине на екологічну ситуацію та зменшить навантаження на екосистеми. Також зазначається, що інтеграція цих підходів може підвищити стійкість виробництв до економічних і екологічних чинників. Впровадження IoT (Internet of Things) та предиктивної аналітики також сприяє оптимізації життєвого циклу електронних пристроїв. Ці технології дозволяють здійснювати моніторинг стану обладнання в реальному часі та прогнозувати необхідність технічного обслуговування, що подовжує термін служби пристроїв та підвищує ефективність використання ресурсів [20].

Процеси збереження цінності (VRP), такі як повторне використання, ремонт, реконструкція та переробка, відіграють важливу роль у цих стратегіях циркулярного дизайну. Однак доречність VRP варіюється залежно від продукту і має оцінюватися індивідуально. До ключових факторів належать характер компонентів, енергоефективність під час використання, залишкова вартість і склад матеріалу. Для багатьох продуктів VRP надає можливість відкрити нові сегменти ринку та збільшити залучення клієнтів, пропонуючи альтернативи абсолютно новим продуктам виробників оригінального обладнання (OEM – original equipment manufacturer). Це може призвести до розвитку інноваційних бізнес-моделей, які інтегрують циклічні принципи, такі як оптимізований дизайн, розширені сервісні контракти і зворотна логістика третьої сторони для управління поверненням продукції в кінці її життєвого циклу.

Застосовність процесів збереження цінності (VRP) у циркулярній економіці, зокрема у виробництві електронних пристроїв, варіюється залежно від продукції та економічного контексту. В цьому сенсі спільні зусилля між зацікавленими сторонами галузі та політиками також мають важливе значення для виявлення можливостей для посилення циркулярності, закриття матеріальних циклів і зменшення

системних втрат. Така співпраця має бути зосереджена на інтеграції VRP в існуючу інфраструктуру виробництва та збору таким чином, щоб вона відповідала конкретним можливостям і викликам різних країн. Різні країни стикаються з унікальними проблемами у впровадженні VRP, але кожна з них має напрацьовані системи, які можуть стати основою для ефективних стратегій. Наприклад:

– країни з налагодженими системами переробки та збору відходів можуть адаптувати ці системи для перенаправлення матеріалів на вторинні ринки, що сприятиме повторному використанню та виробництву відновлюваної енергії;

– країни, яким бракує можливостей для переробки або зворотної логістики, можуть використовувати існуючі мережі прямої логістики для підвищення загальної ефективності системи, беручи за основу кращі практики з інших регіонів;

– країни з обмеженим технологічним потенціалом для VRP можуть отримати вигоду від передачі технологій і торгівлі іншими категоріями товарів, взявши за основу знання щодо поведінки споживачів і стратегії поширення інновацій, які довели свою ефективність у минулому.

Підхід до циркулярної економіки та VRP природно відрізнятиметься між індустріальними та неіндустріальними економіками через відмінності в технологічних, інфраструктурних, ринкових та регуляторних умовах. В індустріально розвинених країнах існуючі виробничі, логістичні та збиральні інфраструктури є глибоко вкоріненими, що робить їх повну перебудову складною і часто вимагає поетапного підходу. І навпаки, неіндустріальним країнам, можливо, доведеться розбудовувати цю інфраструктуру з нуля, зосередившись на інтеграції принципів циркулярної економіки з самого початку.

Для неіндустріальних країн, де переважає неформальна ремонтна діяльність, а офіційні

промислові потужності обмежені, негайна стратегія розвитку циркулярної економіки не повинна бути спрямована на заміну існуючих систем ремонту більш складними VRP. Натомість слід зосередитися на підвищенні ефективності та збереженні цінності поточних практик ремонту, потенційно розширюючи ці системи для покращення результатів як для незалежних ремонтних підприємств, так і для споживачів. Такий підхід гарантує, що перехід до циркулярної економіки є можливим і вигідним, враховуючи існуючий економічний і соціальний контекст.

**Висновки.** Незалежно від рівня розвитку, всі країни мають можливості для інтеграції процесів утримання вартості (VRP) у свої стратегії циркулярної економіки. Ефективність впровадження VRP більше залежить від системних бар'єрів, таких як регуляторні перешкоди та обмежений ринковий доступ, а не від розвитку економіки. Усунення цих бар'єрів сприятиме зменшенню використання нових матеріалів і підвищенню ефективності ресурсів, що позитивно вплине на навколишнє середовище. Для досягнення цієї мети необхідна координація між політиками та галузями, які повинні розробляти інноваційні бізнес-моделі й узгоджувати їх із політичними ініціативами. Впровадження міжнародних стандартів VRP, яке враховує інтереси промисловості, урядів і ринкових гравців, має критичне значення для розвитку промислової циркулярної економіки. Незважаючи на низький рівень впровадження, VRP виявляють великий потенціал у скороченні витрат, створенні робочих місць та зменшенні екологічного впливу. У свою чергу реалізація цього потенціалу вимагає радикальних дій щодо інтеграції циклічних продуктів і систем логістики, технологічні інновації, регуляторні зміни, а також створення нових бізнес-моделей для підтримки ринкових перетворень, що прискорить перехід до циркулярної економіки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N., Hultink E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 143, 757–768.
2. United States International Trade Commission. Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Markets and Trade. USITC Publication No. 4356, 2012, p. 245
3. European Remanufacturing Network. Remanufacturing in Europe: A Snapshot of the European Remanufacturing Industry. European Commission, 2015, p. 80.
4. Pomponi F., Moncaster A. Circular economy for the built environment: a research framework, *J. Clean. Prod.*, 143, 2017, pp.710–718.
5. Environmental Audit Committee Electronic waste and the Circular Economy Volume 1, Report (House of Commons Paper), HC 220 Paperback, 2020, p.79.
6. Ellen MacArthur Foundation Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition., Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 96.
7. Mamudu U. U., Obasi C. D., Awuye S. K., Danso H., Ayodele P., Akinyemi P. Circular economy in the manufacturing sector: Digital transformation and sustainable practices, *International Journal of Science and Research Archive*, 12(02), 2024, pp. 129–141.
8. Potting J., Hekkert M., Worrell E., Hanemaaijer A. Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain, Policy Report., 2017, p. 46.

9. Reike D., Vermeulen W., Witjes S. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options, *Conservation and Recycling*, 135, 2018, pp. 246–264.
10. Stijn A., Eberhardt L., Wouterszoon J., Meijer A. Design guidelines for circular building components based on LCA and MFA., *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 588, 2020, pp.1–8.
11. Behrens J. L., Wills A. T. Impact of Early Design Decisions on Production Costs and Environmental Outcomes, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 42, No. 2, 2016, pp. 112–125.
12. Smith J., Brown L. Modular Systems in Manufacturing: Reducing Waste by 50%, *Journal of Sustainable Manufacturing*, 15(4), 2023, pp. 234–245.
13. Wang X., Lee M. The Impact of Modular Design on Waste Reduction in the Electronics Industry, *Environmental Science & Technology*, 57(7), 2023, pp. 892–900.
14. Bocken N., Pauw I., Bakker C., Grinton B. Product design and business model strategies for a circular economy, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33, 2016, pp. 308–320.
15. Schischke K., Proske M., Nissen N.F., Lang K.D. Modular products: Smartphone design from a circular economy perspective., *Electronics Goes Green 2016 (EGG)*, 2016, pp. 1–8.
16. Cooper T. *Longer Lasting Products: Alternatives to the Throwaway Society*, Routledge, London, 2016, pp. 11–34.
17. Yla-Mella J., Roman E. Circular Economy Strategies for Electric and Electronic Equipment: A Review, *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(8), 2019, pp. 1807–1817.
18. Ellen MacArthur Foundation *Circular Economy in Electronics: Getting the Circulation Going*, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, UK, 2019, pp. 22–30.
19. Despeisse M., Baumers M., Brown P., Charnley F., Ford S., Garmulewicz A., Knowles S., Minshall T., Mortara L., Reed-Tsochas F., Rowley J. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda, *Technological Forecasting and Social Change*, 115, 2017, pp.75–84.
20. Bressanelli G., Adrodegari F., Perona M., Saccani N. Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies, *Sustainability*, 10(3), 2018, pp.639.

## REFERENCES

1. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, 757–768.
2. United States International Trade Commission. *Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Markets and Trade*. USITC Publication No. 4356, (2012), 245
3. European Remanufacturing Network. *Remanufacturing in Europe: A Snapshot of the European Remanufacturing Industry*. European Commission, (2015), 80
4. Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: a research framework, *J. Clean. Prod.*, 143, 710–718.
5. Environmental Audit Committee *Electronic waste and the Circular Economy Volume 1, Report* (House of Commons Paper), HC 220 Paperback, (2020), 79
6. Ellen MacArthur (2013). *Foundation Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition.*, Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation, 96.
7. Mamudu, U. U., Obasi, C. D., Awuye, S. K., Danso, H., Ayodele, P., & Akinyemi, P. (2024). Circular economy in the manufacturing sector: Digital transformation and sustainable practices, *International Journal of Science and Research Archive*, 12(02), 129–141.
8. Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*, Policy Report., 46.
9. Reike, D., Vermeulen, W., & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options, *Conservation and Recycling*, 135, 246–264.
10. Stijn, A., Eberhardt, L., Wouterszoon, J., & Meijer, A. (2020). Design guidelines for circular building components based on LCA and MFA., *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 588, 1–8.
11. Behrens, J. L., & Wills, A. T. (2016). Impact of Early Design Decisions on Production Costs and Environmental Outcomes, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 42, No. 2, 112–125.
12. Smith, J., & Brown, L. (2023). Modular Systems in Manufacturing: Reducing Waste by 50%, *Journal of Sustainable Manufacturing*, 15(4), 234–245.
13. Wang, X., & Lee, M. (2023). The Impact of Modular Design on Waste Reduction in the Electronics Industry, *Environmental Science & Technology*, 57(7), 892–900.
14. Bocken, N., Pauw, I., Bakker, C., & Grinton, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33, 308–320.
15. Schischke, K., Proske, M., Nissen, N.F., & Lang, K.D. (2016). Modular products: Smartphone design from a circular economy perspective., *Electronics Goes Green 2016 (EGG)*, 1–8;
16. Cooper, T. (2016). *Longer Lasting Products: Alternatives to the Throwaway Society*, Routledge, London, 11–34.
17. Yla-Mella, J., & Roman, E. (2019). Circular Economy Strategies for Electric and Electronic Equipment: A Review, *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(8), 1807–1817.

18. Ellen MacArthur (2019). Foundation Circular Economy in Electronics: Getting the Circulation Going, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, UK, 22–30.

19. Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T., Mortara, L., Reed-Tsochas, F., & Rowley, J. (2017). Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda, *Technological Forecasting and Social Change*, 115, 75–84.

20. Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2018). Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies, *Sustainability*, 10(3), 639.

**S. Lukyanuk**, Senior Researcher (Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine). **The value of remanufacturing processes in the electronics industry**

**Abstract.** In recent years, the field of circular economy, in particular, renewable production in the electronics industry, has attracted considerable attention due to its various benefits and key role in the implementation of fundamental principles of value preservation. This is due to the alarming rate of use of natural resources and, as a result, the risk of shortages of some resources, as well as environmental, social and economic changes in the economy. Shifting from a linear economy, where products are discarded after use, to a circular economy, where products and materials remain in the system as long as possible, will contribute to a more sustainable future. These are innovations in production and consumption. Innovations where we move away from resource-intensive models of production and consumption to efficient processes, where innovation will drive change, which is essential to achieving the goals of sustainable development. The rapid development of technologies in the modern electronics industry and the growing demand for new devices are accompanied by significant volumes of electronic waste, which negatively affects the environment and the consumption of natural resources. In response to these challenges, value retention strategies (VRPs), which are key elements of the circular economy, are gaining increasing attention. This paper discusses ways to implement VRP in electronics manufacturing, which involves optimizing processes at all stages of the product life cycle, from raw material extraction to its disposal. The introduction of VRP in the electronics industry has the potential to significantly reduce waste and reduce the negative impact on the environment. This is achieved by extending the life cycle of products, reusing components and materials, and implementing more efficient recycling methods. However, the effectiveness of VRP implementation largely depends on the specifics of the industry and the particular conditions of use. On the other hand, in other segments, such as consumer electronics, where product refresh cycles are less intensive, VRP can be implemented at lower costs and faster. Among the advantages of VRP are not only lower material costs and reduced dependence on primary resources, but also the possibility of creating new business models based on product maintenance and reuse. However, the disadvantages may include the difficulty of integrating these processes into existing production chains, as well as the need for significant changes in business structure and staff training.

**Key words:** renewable production, circular economy, value preservation strategies, design for renewable production, product life cycle, electronics.