

Лук'янюк С. В.Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ЕКОДИЗАЙН ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Зростаюче значення еко-дизайну в електронній промисловості в поєднанні з дедалі жорсткішими нормами Європейського Союзу щодо екологічного довілля зумовлює необхідність розробки та впровадження передових методологій, які інтегрують принципи еко-дизайну у виробництво електронних пристроїв. Оскільки сучасні виробничі парадигми зміщуються в бік циркулярної економіки, впровадження інтелектуальних інструментів і технологій, заснованих на даних, стає необхідним для оптимізації ефективності використання ресурсів і мінімізації впливу на навколишнє середовище. У цьому дослідженні проаналізовано існуючі підходи, моделі та стратегії еко-дизайну у виробництві електронних пристроїв, висвітлено їхні переваги та обмеження. Аналіз існуючих підходів показує, що хоча сучасні методології надають цінну інформацію, але вони не повністю враховують унікальні складнощі електронного виробництва, особливо щодо вибору матеріалів, довговічності компонентів та можливості їхньої переробки після закінчення терміну служби. Щоб подолати цю прогалину, необхідно розробити нові моделі на основі існуючих фреймворків, інтегруючи при цьому найсучасніші наукові досягнення. У статті розглянуто методологію еко-дизайну, орієнтованого на переробку, яка інтегрує сучасні цифрові технології та інтелектуальні системи автоматизації. Запропонований підхід спрямований на підвищення екологічної ефективності та забезпечення стійкості протягом усього життєвого циклу продукту. Особливу увагу приділено інструментам, що дозволяють оптимізувати проектування, виробничі процеси, експлуатацію та утилізацію, сприяючи реалізації принципів циркулярної економіки та зменшенню негативного впливу на довкілля. Даний підхід використовує оригінальний набір індикаторів переробки, які полегшують оцінку придатності до вторинної переробки, забезпечуючи оптимальне відновлення матеріалів та зменшення електронних відходів. Крім того, ця методологія забезпечує безперешкодну інтеграцію в розподілені середовища проектування та підтримує взаємодію з різними системами САПР, що дозволяє оновлювати дані в режимі реального часу та проводити автоматизовану оцінку впливу на довкілля без безпосереднього втручання користувача. Дослідження підкреслює необхідність постійних інновацій у методології екодизайну, виступаючи за міждисциплінарні дослідження, що поєднують штучний інтелект, машинне навчання та практики інжинірингу. Впроваджуючи інструменти еко-дизайну, адаптовані до специфічних вимог виробництва електронних пристроїв, це дослідження сприяє розвитку більш ефективних, екологічно відповідальних і відповідних нормативним вимогам виробничих процесів в електронній промисловості. Застосування таких інструментів дозволяє оптимізувати виробничі практики, знизити екологічний вплив і підвищити раціональність використання ресурсів. Зазначається, що інтеграція еко-дизайну враховує як особливості матеріалів, що використовуються у виробництві електроніки, так і технологічні обмеження, що дозволяє забезпечити відповідність сучасним стандартам сталого розвитку та екологічних регуляцій.

Ключові слова: відновлюване виробництво, термін служби, еко-дизайн, дизайн для відновлюваного виробництва, методологія, електронна промисловість.

Постановка проблеми. Впровадження екологічних норм у виробничий сектор електричного та електронного обладнання ґрунтується на двох ключових аспектах: мінімізації відходів на стадії виробництва та оптимізації життєвого циклу продукції з метою подальшої переробки. Перший аспект стосується розробки екологічно оптимізованих продуктів – таких, що включають відновлювані та нетоксичні матеріали, мають високий ступінь переробки або повторного використання,

а також відповідають принципам циркулярної економіки [1, 2]. Другий аспект стосується самих виробничих процесів, які повинні бути розроблені таким чином, щоб оптимізувати енергоефективність, зменшити викиди шкідливих речовин (газоподібних, рідких і твердих забруднювачів) і забезпечити відповідальне поводження з відходами. Сучасні методології екодизайну не повною мірою враховують необхідність інтеграції принципів циркулярної економіки у вироб-

ничі процеси. Відсутність системного підходу до інтеграції цих принципів обмежує можливості переходу до економіки замкнутого циклу. Таким чином необхідність переходу до замкнених циклів виробництва потребує розробки методологічної моделі, яка б дозволила враховувати можливість повторного використання матеріалів та компонентів на етапі проектування [3]. Слід зазначити, що існуючі підходи часто не враховують складність процесів утилізації та повторного використання матеріалів (рециклінгу), а також не забезпечують достатнього рівня інтеграції між різними етапами життєвого циклу продукту. Зокрема, вони не враховують технічні обмеження, що виникають при розділенні матеріалів, деградації властивостей під час переробки, а також енергетичні витрати, пов'язані з цими процесами [4]. Сучасні дослідження у сфері екодизайну підкреслюють, що відсутність взаємозв'язку між етапами життєвого циклу, такими як вибір матеріалів, виробництво, використання, утилізація та рециклінг, призводить до значних втрат ресурсів і збільшення обсягів відходів. Наприклад, за даними Європейського агентства з охорони довкілля (EEA – European Environment Agency), лише близько 12 % матеріалів, що використовуються у виробництві, походять із вторинної сировини, що свідчить про низьку ефективність існуючих процесів рециклінгу [5]. Ще однією проблемою є те, що дизайн продукції часто орієнтований на короткострокову функціональність, а не на довгострокову екологічну ефективність. Наприклад, складні багатокомпонентні конструкції, що використовують матеріали з різними властивостями, ускладнюють процеси їх розділення для переробки. Це особливо актуально для електроніки, де поєднання рідкоземельних металів, пластику та інших компонентів створює значні труднощі для утилізації. Для вирішення цих проблем сучасна методологія екодизайну повинна враховувати наступні аспекти:

- модульність конструкцій – забезпечення можливості легкого розділення матеріалів і компонентів на етапі утилізації;
- використання матеріалів із низьким впливом на довкілля – зокрема, біорозкладних або таких, що легко піддаються переробці;
- розробка систем оцінки життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) – для інтеграції екологічних параметрів на всіх етапах проектування та виробництва;
- інноваційні підходи до переробки – наприклад, застосування хімічного рециклінгу або про-

цесів, які дозволяють відновлювати матеріали до стану, близького до первинного.

Таким чином, ефективний екодизайн повинен не лише враховувати складність процесів утилізації та повторного використання, але й забезпечувати системний зв'язок між усіма етапами життєвого циклу [3, 6]. Інтеграція цих аспектів може сприяти досягненню більш стійкого споживання ресурсів, зменшенню екологічного навантаження та переходу до моделі замкнутого циклу. Як наслідок, виникає потреба у розробці методології, яка б сприяла створенню продуктів, придатних для рециклінгу, та забезпечувала ефективне використання вторинних матеріалів. Комплексне дослідження проблематики виявляє ряд критичних аспектів, що потребують науково-технічного опрацювання:

- проблематика використання критичних сировинних ресурсів – інкорпорація рідкоземельних елементів та інших матеріалів, класифікованих як «критичні», значно ускладнює технологічні процеси рециклінгу та генерує підвищені екологічні ризики. Складні хімічні та фізичні властивості компонентів потребують індивідуального підходу до розробки методів їхньої переробки та повторного використання;

- технологічна недосконалість процесів рециклінгу – наявний інструментарій переробки характеризується недостатньою селективністю та ефективністю при екстракції цінних функціональних компонентів із відпрацьованих технічних систем. Спостерігається дефіцит високотехнологічних рішень, що забезпечують максимальне збереження матеріальної цінності при мінімальних енергетичних затратах;

- відсутність економічних механізмів стимулювання використання вторинних матеріалів – суб'єкти виробничої діяльності проявляють низький рівень зацікавленості у використанні вторинних матеріалів через їх потенційно знижені фізико-механічні характеристики або підвищену собівартість внаслідок комплексних процесів переробки. Економічна парадигма потребує трансформації шляхом впровадження принципів ресурсоефективності;

- кумулятивний ефект мікроконцентрацій токсичних субстанцій – у складі технічних виробів часто присутні шкідливі речовини в незначних концентраціях, які, однак, проявляють тенденцію до біоаккумуляції в екосистемах та формування довгострокових негативних ефектів. Даний аспект потребує впровадження превентивних методологій проектування з урахуванням повного життєвого циклу продукції.

Вищезазначені проблеми актуалізують необхідність розробки інтегрованих підходів до екодизайну, що забезпечуватимуть системну оптимізацію матеріальних потоків. Перспективним напрямком є створення комплексних інформаційних систем моніторингу хімічного складу виробів для підвищення ефективності їх подальшої переробки, розробці інноваційних матеріалів із підвищеною здатністю до рециклінгу та розвитку адаптивних технологічних процесів, що забезпечують максимальне збереження ресурсного потенціалу вторинної сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системний підхід до проектування, що враховує життєвий цикл матеріалів та можливість їх повторного використання, представлений рециклінг-орієнтованим екодизайном, є необхідною умовою для забезпечення сталого розвитку в умовах виснаження природних ресурсів та акумуляції відходів. Наукова спільнота проявляє підвищений інтерес до даної проблематики, що відображається у значній кількості публікацій, присвячених теоретико-методологічним та прикладним аспектам інтеграції принципів рециклінгу в інженерний дизайн виробів. Проведений аналіз літературних джерел дозволяє систематизувати наявні знання та виявити перспективні напрямки подальших досліджень. Історичний аналіз показує, що концепція екологічно орієнтованого проектування пройшла значну еволюцію від фрагментарних підходів до системного інтегрування екологічних аспектів у процес розробки виробів. У роботі [7] зазначається, що трансформація парадигми інженерного дизайну відбувалася паралельно з розвитком екологічної свідомості суспільства та посиленням регуляторних вимог. Автори відзначають, що рециклінг, як елемент інженерного дизайну, почав активно впроваджуватися в 1990-х роках, однак системний підхід до проектування з урахуванням повного життєвого циклу виробів сформувався лише на початку XXI століття. Значний внесок у розвиток теоретичних засад рециклінг-орієнтованого екодизайну зроблено в роботі [3], в якій автори запропонували модель циркулярного дизайну продукції, що передбачає інтеграцію принципів рециклінгу на етапі концептуального проектування. Дана модель відображає перехід від традиційної лінійної моделі «видобуток-виробництво-споживання-утилізація» до циркулярної моделі, де відходи одного виробничого циклу стають ресурсами для іншого. Дослідники в роботі [8] провели комплексний аналіз існуючих методологій екодизайну та виявили, що біль-

шість із них фокусується на зниженні впливу на довкілля на етапі виробництва та експлуатації, приділяючи недостатню увагу етапу утилізації та рециклінгу. Автори наголошують на необхідності розробки інтегрованих підходів, що забезпечують оптимізацію екологічних показників протягом усього життєвого циклу виробу.

Важливим етапом у розвитку концепції рециклінг-орієнтованого екодизайну стало формування ряду ключових методологій.

Методологія “Design for Disassembly” (DfD). Цей підхід фокусується на розробці конструкцій, що дозволяють швидко та ефективно розбирати вироби на компоненти для подальшої переробки. Дослідження авторів в роботі [9] показують, що застосування принципів DfD може збільшити показники рециклінгу електронного обладнання на 20–30 %. Систематизація принципів DfD представлена в роботі [10], в якій автори виділяють наступні ключові аспекти: мінімізація кількості з’єднань, використання стандартизованих з’єднань, забезпечення доступу до з’єднань, мінімізація кількості інструментів для демонтажу, використання матеріалів, що легко ідентифікуються. Однак, як відзначають автори, застосування цих принципів може входити в протиріччя з іншими вимогами до виробу, такими як міцність, надійність або естетичні характеристики. Авторами в роботі [11] пропонується методологія кількісної оцінки показників DfD на основі індексу легкості демонтажу, яка враховує час, необхідний для розбирання виробу, кількість операцій та складність інструментів. Дана методологія дозволяє порівнювати різні конструктивні рішення та обирати оптимальні з точки зору подальшого рециклінгу. Однак, як зазначають автори, оцінка показників DfD на ранніх етапах проектування залишається викликом через відсутність детальної інформації про конструкцію виробу. Аналіз слабких сторін підходу DfD, проведений дослідниками в роботі [12], показує, що його ефективність значною мірою залежить від наявності відповідної інфраструктури для збору та сортування відходів. Крім того, автори відзначають, що економічна доцільність демонтажу може бути низькою для виробів із невисокою вартістю матеріалів, що обмежує застосування даного підходу.

Методологія «Design for Recyclability» (DfR) фокусується на виборі матеріалів та технологій, що забезпечують ефективну переробку виробів після закінчення терміну їх експлуатації. Дослідження авторів у роботі [13] показує, що застосування принципів DfR дозволяє збільшити частку

матеріалів, що підлягають рециклінгу, на 15–40 % залежно від типу виробу. Систематизація принципів DfR представлена в роботі [14], якій дослідники виділяють наступні ключові аспекти: мінімізація кількості різних матеріалів, використання матеріалів, що легко ідентифікуються та сортуються, уникнення комбінацій матеріалів, що ускладнюють переробку, мінімізація використання добавок та наповнювачів. Автори наголошують, що впровадження цих принципів потребує комплексного підходу, що враховує технічні, економічні та екологічні аспекти. В роботі [15] автори пропонують методологію кількісної оцінки показників DfR на основі індексу рециклінгу, що враховує частку матеріалів, які можуть бути перероблені, енергетичні витрати на переробку та екологічний вплив процесів рециклінгу. Дана методологія дозволяє оптимізувати вибір матеріалів та технологій на етапі проектування для досягнення максимальної ефективності рециклінгу. Аналіз слабких сторін підходу DfR, проведений дослідниками в роботі [16], показує, що його ефективність обмежується технологічними можливостями існуючих процесів переробки та ринковим попитом на вторинні матеріали. Крім того, автори відзначають, що застосування принципів DfR може призводити до зростання собівартості виробів та зниження їх функціональних характеристик.

Методологія «Design for Circularity» (DfC) представляє собою розширення концепцій DfD та DfR, фокусуючись на проектуванні виробів для циркулярної економіки, де відходи одного виробничого циклу стають ресурсами для іншого. Дослідження авторів в роботі [17] показує, що застосування принципів DfC дозволяє значно зменшити споживання первинних ресурсів та обсяги відходів, що підлягають захороненню. Систематизація принципів DfC представлена в роботі [18], в якій виділяються наступні ключові аспекти: проектування довговічних виробів, забезпечення можливості ремонту та модернізації, створення систем повторного використання компонентів, розробка ефективних технологій рециклінгу матеріалів. В роботі наголошується, що впровадження цих принципів потребує трансформації бізнес-моделей та споживчої поведінки. В роботі [19] автори пропонують методологію кількісної оцінки показників DfC на основі індексу циркулярності, що враховує тривалість життєвого циклу виробу, потенціал повторного використання компонентів та ефективність рециклінгу матеріалів. Дана методологія дозволяє порівнювати різні дизайнерські рішення та обирати оптимальні з точки зору

принципів циркулярної економіки. Аналіз слабких сторін підходу DfC, проведений дослідниками в роботі [20], показує, що його ефективність обмежується відсутністю відповідної інфраструктури та економічних стимулів для впровадження циркулярних бізнес-моделей. Крім того, автори відзначають, що системна трансформація виробничих та споживчих практик потребує значних інвестицій та тривалого часу.

Постановка завдання. Метою статті є проведення комплексного дослідження принципів ефективного екодизайну в галузі виробництва електронних пристроїв. Основна мета полягає в аналізі різноманітних підходів, що враховують не лише складність процесів утилізації та повторного використання, але й забезпечують інтеграцію всіх стадій життєвого циклу продукту. Впровадження таких підходів сприяє оптимізації використання ресурсів, мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та переходу до циклічної економіки. Таким чином, виникає необхідність у розробці методології, що стимулює створення продуктів, придатних для рециклінгу, та гарантує ефективне застосування вторинних матеріалів. Концепція ефективного екодизайну є багатогранною та залежить від регіональних та контекстуальних факторів. Отже, актуальним є дослідження різних методологій та філософій, що лежать в основі впровадження відновлювального виробництва. В той же час систематичний аналіз дозволяє сформулювати цілісне розуміння ключових питань, що виникають у цій сфері.

Виклад основного матеріалу. Процес інженерного дизайну представляє собою цілісну систему, яка базується на трьох ключових аспектах: проектуванні конструкції, підборі матеріалів і розробці технологій [21]. Ці аспекти не існують ізольовано, а працюють у взаємозалежності, формуючи єдину структуру. Наприклад, рішення, прийняті на етапі вибору матеріалів, можуть суттєво впливати на технологічну реалізацію продукту та його конструктивні характеристики, що вимагає ретельної координації між усіма складовими. Слід більш детально розглянути кожен з цих аспектів.

Конструктивний дизайн. На цьому етапі визначаються форма, геометричні характеристики та допуски на складання виробу, щоб забезпечити його функціональність, ефективність і простоту виготовлення [21]. Фундаментальний принцип проектування підкреслює, що простіші конструкції забезпечують кращу ефективність, економічність і придатність до вторинної переробки. Крім

того, мінімізація використання матеріалів при збереженні структурної цілісності є ключовим завданням еко-дизайну, що безпосередньо сприяє ресурсоефективності та сталому розвитку.

Вибір матеріалу є ключовим етапом у розробці продукту, оскільки він безпосередньо впливає на механічні, фізичні та хімічні властивості пристрою [22]. Поширення сучасних матеріалів на біологічній основі, матеріалів, що підлягають вторинній переробці, та гібридних матеріалів розширює діапазон вибору, доступного для дизайнерів. Хоча тенденції стандартизації матеріалів спрямовані на обмеження надмірної диверсифікації, інновації в матеріалознавстві продовжують впроваджувати високоефективні альтернативи, сприяючи виробництву довговічних, але придатних для вторинної переробки електронних компонентів.

Технологічний дизайн. Вибір виробничих процесів є не менш важливим, оскільки він визначає кінцеву структурну цілісність, споживання енергії та утворення відходів [23]. Такі процеси, як адитивне виробництво (AM – Additive Manufacturing), точна механічна обробка та виробництво на основі «зеленої хімії», стають дедалі популярнішими завдяки мінімальним відходам матеріалів та низькому впливу на навколишнє середовище. Крім того, оптимальна стратегія складання має важливе значення для забезпечення того, щоб компоненти продукту були не тільки ефективно інтегровані, але й легко відокремлювалися в кінці їхнього життєвого циклу, що сприяє повторному використанню та відновленню.

Варто зазначити, що технологічний дизайн також повинен враховувати такі фактори, як масштаб виробництва, рівень автоматизації та можливість циклічного виробництва. Інтеграція технологій Індустрії 4.0, прогнозованого технічного обслуговування та роботизованої автоматизації ще більше підвищує ефективність процесу, зменшуючи при цьому відходи матеріалів та споживання енергії. Саме в цьому сенсі в основі методології екодизайну, орієнтованого на переробку, покладено структурований підхід, який від самого початку інтегрує придатність до вторинної переробки та ресурсоефективність у дизайні продукту [24]. Цей підхід ґрунтується на наступних принципах:

- вибір матеріалів для циклічної переробки – надання пріоритету нетоксичним матеріалам, які легко відокремлюються та придатні для вторинної переробки;
- дизайн для розбирання (DfD) та повторного використання – впровадження модульних архітектур та стандартизованих інтерфейсів для полег-

шення розбирання, ремонту та повторного використання компонентів, тим самим подовжуючи термін служби продукту та зменшуючи утворення відходів [25];

- енергоефективне виробництво з низьким рівнем викидів – оптимізація виробничих процесів для мінімізації споживання енергії, води та викидів вуглекислого газу з одночасним впровадженням стратегій відновлення та реконструкції;

- управління утилізацією та реверсна логістика – створення систем для ефективного збору, сортування та відновлення матеріалів, що забезпечує високий вихід цінних матеріалів з викинутих електронних пристроїв;

- цифрові моделі та прогнозування на основі штучного інтелекту – використання штучного інтелекту, машинного навчання та моделювання цифрових моделей для прогнозування деградації матеріалів, оптимізації переробки наприкінці терміну служби та покращення оцінки придатності до вторинної переробки.

Проте складність інтеграції принципів екодизайну, орієнтованого на переробку, в інженерну практику потребує структурованого управління проектуванням [26]. А для ефективної реалізації екодизайну, що зумовлено його міждисциплінарною природою, необхідна інтеграція знань та зусиль фахівців з різноманітних галузей. Зокрема, до таких галузей належать – матеріалознавство, машинобудування, електроніка, екологія та управління ланцюгами поставок. Крім того, через варіативність дизайну продукції, виробничих процесів та організаційних структур не існує універсальної методології, яку можна було б застосувати в усіх галузях промисловості [27]. В окремих випадках слід адаптувати стратегії екодизайну до конкретних операційних моделей, нормативно-правової бази та вимог ринку. Оптимізація екодизайну, орієнтованого на рециклінг, передбачає:

- стратегічне планування – визначення чітких екологічних цілей та включення їх у корпоративну політику сталого розвитку;

- міжфункціональна співпраця – сприяння комунікації та співпраці між дизайнерами, інженерами, матеріалознавцями та регуляторними експертами;

- передові аналітичні інструменти – використання програмного забезпечення LCA (Life Cycle Assessment), аналізу методом скінченних елементів (FEA – finite element analysis) та алгоритмів оптимізації на основі штучного інтелекту для оцінки впливу на навколишнє середовище та характеристик матеріалів [28].

Процес еко-дизайну складається з кількох етапів, кожен з яких відіграє вирішальну роль у забезпеченні сталості та придатності до переробки електронних пристроїв. Ці етапи включають розробку робочої концепції, планування, концептуальний дизайн, загальний дизайн, детальний дизайн, верифікацію, перевірку прототипу та впровадження у виробництво. Структурований та аналітичний підхід до кожного етапу підвищує ефективність використання ресурсів, зменшує утворення відходів та сприяє впровадженню принципів циркулярної економіки [29].

Розробка робочої концепції – початковий етап еко-дизайну, орієнтованого на переробку, який передбачає розробку структурованої робочої концепції. Ця фаза фокусується або на вдосконаленні існуючого продукту з екологічної точки зору, або на створенні абсолютно нової концепції, яка відповідає цілям сталого розвитку. Основна мета полягає у створенні стратегічного плану, який ефективно інтегрує стратегії покращення стану довкілля. Оскільки не існує універсальної схеми, застосовної до всіх продуктів, кожен дизайн розробляється індивідуально, виходячи з його конкретних вимог, ринкового попиту і технологічної доцільності. Оцінку запропонованих змін у дизайні слід порівнювати з базовим продуктом, використовуючи числові екологічні показники для оцінки покращення екологічних характеристик. Сучасні обчислювальні інструменти, такі як вибір матеріалів на основі штучного інтелекту та цифрове моделювання моделей, ще більше оптимізують цей етап, прогножуючи вплив на навколишнє середовище модифікацій дизайну.

Етап планування. Ефективне планування є наріжним каменем успішної реалізації еко-дизайну [30]. Цей етап починається з комплексного аналізу ринку для збору необхідної інформації для прийняття рішень. Основні напрямки дослідження повинні включати:

- аналіз ринкового попиту та очікувань споживачів – розуміння потреби в нових продуктах або вдосконаленні існуючих;
- аналіз конкурентних продуктів – оцінка аналогічних продуктів для виявлення можливостей для підвищення стійкості;
- потенціал ринку – оцінка економічної доцільності та потенційної швидкості прийняття екологічно розроблених продуктів.

Використовуючи передові аналітичні методи, такі як аналіз вартості життєвого циклу (LCCA – lifecycle cost analysis) та опитування споживачів, орієнтовані на сталий розвиток, дають цінну

інформацію. Наряду з цим використання методу анкетування разом з аналітикою великих даних допомагає зрозуміти поведінку споживачів і тенденції вподобань, забезпечуючи відповідність еко-дизайну потребам ринку та дотримання регуляторних вимог.

Етап концептуального дизайну. На цьому етапі розробляється основна концепція електронного пристрою, що включає екологічні міркування у вибір матеріалів та виробничі процеси [31]. На цьому етапі важливо провести оцінку впливу на навколишнє середовище використовуючи різні інструменти та методології:

- оцінка життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) – комплексний інструмент для оцінки впливу продукту на навколишнє середовище від видобутку сировини до утилізації після закінчення терміну експлуатації;
- матеріальні витрати на одиницю послуги (MIPS – Material Input Per Service Unit) – вимірюється ресурсоефективність продукту;
- показник матеріаломісткості (MIT – Material Intensity Indicator) – оцінюється споживання матеріалів відносно функціональності продукту;
- методи еко-індикаторів – кількісна оцінка впливу на навколишнє середовище на основі стандартизованих критеріїв.

Для оптимізації ефективності використання матеріалів, полегшення модульності, прогнозування потенціалу для вторинної переробки, покращення процесу прийняття рішень раціонально використовувати платформи екодизайну на основі штучного інтелекту та CAD/CAM-систем.

Етап загального проектування. Цей етап розширює концептуальну основу, перетворюючи ідеї на детальні конфігурації продукту. Основна увага повинна приділятися наступним аспектам [32]:

- вибір матеріалів – забезпечення використання матеріалів, придатних для вторинної переробки, нетоксичних та екологічно чистих;
- визначення технологічного процесу – визначення екологічно чистих методів виробництва, таких як адитивне виробництво, низько енергетична пайка та замкнуті системи водопостачання;
- розробка документації – створення детальних технічних специфікацій та звітів про сталий розвиток.

Етап загального проектування також інтегрує принципи забезпечення якості, для гарантування того, що заходи еко-дизайну не вплинуть на продуктивність продукту. Використовуючи цифрове прототипування та віртуальне моделювання, інженери можуть оцінити доцільність викорис-

тання екологічно чистих матеріалів ще до початку фізичного виробництва.

Етап детального проектування. На цьому етапі варіанти матеріалів і процесів, які можуть бути запропоновані, зводяться до одного або декількох варіантів. З ціллю проведення оптимального процесу проектування розробники використовують бази даних, системи підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту та оцінки життєвого циклу матеріалів та рекомендується використовувати наступні підходи:

- вибір і стандартизація компонентів – використання модульних підходів до проектування для полегшення розбирання та переробки;
- екологічно чисті методи склеювання – мінімізація кількості клеїв, що перешкоджають переробці;
- енергоефективне проектування схем – зменшення енергоспоживання та тепловиділення.

Верифікація дизайну та перевірка прототипу. Етап верифікації гарантує, що запропонований дизайн відповідає екологічним та функціональним вимогам. Цей процес включає в себе наступні операції:

- аналіз технічної документації – виявлення потенційних недоліків дизайну до виготовлення прототипу;
- фізичне тестування прототипу – оцінка довговічності, функціональності та придатності до вторинної переробки;
- аналіз режимів та наслідків відмов (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) – систематична оцінка потенційних відмов, які можуть вплинути на екологічні показники.

Використовуючи цифрове моделювання та алгоритми прогнозування технічного обслуговування, виробники можуть оптимізувати життєвий цикл продукту та його придатність до вторинної переробки після закінчення терміну експлуатації.

Виробництво та виведення на ринок. Це заключний етап, який включає в себе широко-масштабне виробництво і виведення на ринок продукції. Ключовими аспектами цього етапу є:

- сталі методи виробництва – впровадження енергоефективних процесів і замкнутих матеріальних потоків;
- екологічне маркування та сертифікація – отримання екологічних сертифікатів, таких як EPEAT, Energy Star та Blue Angel;
- прогнозування витрат протягом життєвого циклу – оцінка експлуатаційних витрат та витрат на утилізацію для забезпечення економічної доцільності.

Висновки. Таким чином, комплексна методологія еко-дизайну, орієнтована на переробку, має важливе значення для зменшення впливу електронних пристроїв на довкілля. Систематично звертаючись до кожного етапу процесу проектування – від розробки концепції до виведення на ринок – виробники можуть підвищити ефективність використання ресурсів, сприяти переробці та відповідати світовим стандартам сталого розвитку. Інтеграція передових наукових методологій, таких як вибір матеріалів на основі штучного інтелекту, LCA та цифрове моделювання, ще більше посилює стратегії еко-дизайну, гарантуючи, що електронні пристрої сприятимуть більш стійкій та циркулярній економіці.

Список літератури:

1. Bocken N.M., Pauw I., Bakker C., Van der Grinten B. Product design and business model strategies for a circular economy, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 2016, pp. 308–320.
2. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: from definition to implementation, *Journal of Cleaner Production*, 114, 2016, pp. 11–21.
3. Bakker C., Wang F., Huisman J., Hollander M. Products that go round: exploring implications of the circular economy for product design, *Journal of Cleaner Production*, 69, 2014, pp. 17–28.
4. Lieder M., Rashid A. Towards circular economy implementation: a framework in relation to the historic development of EI, *Journal of Cleaner Production*, 115, 2016, pp. 36–51.
5. EEA (European Environment Agency). Circular economy in Europe – developing the knowledge base. EEA Report No. 11/2019, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
6. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: from definition to implementation, *Journal of Cleaner Production*, 114, 2016, pp. 11–21.
7. Kim H., Paques J. Evolution of eco-design paradigm: A historical perspective, *Journal of Sustainable Design and Innovation*, 9(2), 2021, pp. 112–125.
8. Paras A., Teixeira R., Figueiredo V. Review of eco-design methodologies: Focus on end-of-life stage, *Sustainable Production and Consumption*, 18, 2019, pp. 218–232.
9. Vanegas P., Peeters J.R., Cattrysse D., Tecchio P. Disassembly line design for electronic waste: A review and classification, *Journal of Cleaner Production*, 172, 2018, pp. 4461–4475.

10. Sabaghi M., Bidhandi H.M., Tseng M.L. A review of design for disassembly: Methodologies, tools, and applications, Resources, Conservation and Recycling, 112, 2016, pp. 151–164.
11. Rocha L. C., Gomes J. P., da Silva, F. J. G. Quantitative assessment of design for disassembly: A disassembly ease index, Journal of Manufacturing Systems, 66, 2023, pp. 280–292.
12. Choi J., Lee S., Kim T. Challenges and limitations of design for disassembly in electronic product recycling, Waste Management, 142, 2022, pp. 150–162.
13. Mathieux F., Ardente F., Arena M., Bobba S. Design for recyclability: A critical review of existing approaches, Resources, Conservation and Recycling, 146, 2019, pp. 416–430.
14. Wagner T., Schlummer M. Design for recyclability: A systematic review of principles and guidelines, Sustainable Materials and Technologies, 26, 2020, p. 222–234.
15. Han Y., Kim J., Lee H. Quantitative evaluation of design for recyclability: A recyclability index, Journal of Cleaner Production, 385, 2023, pp. 13576–13588.
16. Singh A., Kumar R., Singh V. Limitations of design for recyclability in the context of emerging economies, Environmental Science and Pollution Research, 28(15), 2021, pp. 18884–18898.
17. De los Rios I., Charnley S. From design for disassembly to design for circularity: A review, Journal of Cleaner Production, 142, 2017, pp. 797–805.
18. Moreno M., De los Rios C., Rowe Z., Charnley S. A conceptual framework for circular design implementation, Journal of Cleaner Production, 175, 2018, pp. 16–35.
19. Bocken N.M., Ritala P., Albareda L. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes, Journal of Cleaner Production, 330, 2022, pp. 129752–129772.
20. Korhonen J., Honkasalo A., Seppala J. Circular economy: the concept and its limitations, Ecological Economics, 143, 2018, pp. 37–46.
21. Dieter G.E., Schmidt L.C. Engineering design 6th edition, McGraw-Hill Education, 2020, pp. 656.
22. Ashby M.F. Materials selection in mechanical design, third edition 2005, Butterworth-Heinemann, 2005, p. 624.
23. Gutowski T.G., Dahmus J.B., Thiriez A. Electrical energy requirements for manufacturing processes, 17th CIRP conference on life cycle engineering, 2009, pp. 623–628.
24. Tischner U., Charter M. Sustainable product development, Sheffield, UK: Greenleaf Publishing, 2001, 384 p.
25. Maxwell D., Van der Vorst R., Gijzel J. Product lifetime optimization: a component-based approach, Journal of Industrial Ecology, 10(1–2), 2006, pp. 173–190.
26. Dewulf W., Dufflou J.R. Design for X (DfX): a conceptual framework and industrial case studies, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 129(6), 2007, pp. 1198–1207.
27. Cooper T., Allwood J. Rethinking Design for Sustainability, Sustainable Development, 20(3), 2012, pp. 201–217.
28. European Commission. Eco-design requirements for energy-related products, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012, 52 p.
29. Luttrupp C., Lagerstedt J. EcoDesign and product development strategies aiming at function optimisation and dematerialization, Environmental Management and Health, 17(4), 2006, pp. 408–420.
30. Pigosso D.C.A., McAloone T.C., Rozenfeld H. Ecodesign integration in product development: Part 1 – A literature review, Journal of Engineering Design, 24(1–3), 2013, pp. 1–26.
31. Rath S. Design for Environment: A holistic approach, New Delhi: TERI Press, 2006, pp. 150–175.
32. Tischner U., Charter M. Sustainable product design, Earthscan, 2001, pp. 90–115.

Lukyanuk S.V. ECODESIGN AS THE BASIS OF MODERN ENGINEERING DESIGN

The growing importance of eco-design in the electronics industry, coupled with increasingly stringent European Union environmental regulations, necessitates the development and implementation of advanced methodologies that integrate eco-design principles into the production of electronic devices. As modern manufacturing paradigms shift towards a circular economy, the introduction of intelligent tools and data-driven technologies is becoming necessary to optimize resource efficiency and minimize environmental impact. This study analyzes existing eco-design approaches, models, and strategies in the production of electronic devices, highlighting their advantages and limitations. The analysis of existing approaches shows that while current methodologies provide valuable information, they do not fully take into account the unique challenges of electronic manufacturing, especially in terms of material selection, component durability, and end-of-life recyclability. To bridge this gap, new models need to be developed based on existing frameworks while integrating the latest scientific advances. This paper presents a recycling-oriented eco-design methodology that integrates modern digital technologies and intelligent automation systems. The proposed approach

is aimed at improving environmental efficiency and ensuring sustainability throughout the product life cycle. Particular attention is paid to tools that optimize design, production processes, operation, and disposal, contributing to the implementation of the principles of the circular economy and reducing the negative impact on the environment. This approach uses an original set of recycling indicators that facilitate the assessment of recyclability, ensuring optimal material recovery and reducing e-waste. In addition, this methodology provides seamless integration into distributed design environments and supports interaction with various CAD systems, allowing for real-time data updates and automated environmental impact assessment without direct user intervention. The study emphasizes the need for continuous innovation in ecodesign methodology, advocating interdisciplinary research that combines artificial intelligence, machine learning, and engineering practices. By introducing eco-design tools adapted to the specific requirements of electronic device manufacturing, this research contributes to the development of more efficient, environmentally responsible and compliant manufacturing processes in the electronics industry. The use of such tools can optimize production practices, reduce environmental impact, and increase resource efficiency. It is noted that the integration of eco-design takes into account both the characteristics of the materials used in electronics production and technological limitations, which allows for compliance with modern standards of sustainable development and environmental regulations.

Key words: *renewable production, service life, eco-design, design for renewable production, methodology, electronics industry.*