УДК: 621.9:004.8:658.5

С.В.Ковалевський

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПОТОКОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Донбаська державна машинобудівна академія

Анотація. *Стаття зосереджується на розробці методів оптимізації технологічних процесів через керування енергетичними, матеріальними, та інформаційними потоками. Запропоновано створення символьних моделей для різноманітних режимів роботи технологічного обладнання та методи встановлення оптимальних параметрів для кожного типу потоків. Основна увага спрямована на впровадження алгоритмів, здатних точно діагностувати стан технологічних систем і автоматично адаптувати їх робочі параметри з метою максимізації ефективності виробничих процесів. Цей цілісний підхід має на меті не лише підвищення загальної продуктивності та поліпшення якості кінцевої продукції, але й зниження оперативних витрат через інтелектуальне управління процесами на основі детального аналізу даних. Такий підхід відкриває нові горизонти для подальшого розвитку автоматизованих систем управління, здатних ефективно балансувати між складними взаємодіями різних потоків та адаптуватися до потреб виробництва в реальному часі. В роботі підкреслюється значущість включення передових технологій, як-от машинне навчання та штучний інтелект, у технологічні процеси для посилення адаптивності та ефективності виробництва. Значна увага приділяється розробці користувацьких інтерфейсів, які сприяють зручному налаштуванню та контролю процесів, а також забезпечують можливість інтеграції з іншими технологічними системами управління на підприємстві. Описаний підхід демонструє, що інтелектуальне управління потоками може забезпечувати не лише безпосередні вигоди для ефективності підприємства, але й вносить вклад у ширші цілі сталого розвитку, підкреслюючи потенціал для створення новітніх систем адаптивного управління, заснованих на глибокому аналізі та розумінні технологічних процесів.*

Ключові слова: *оптимізація процесів, технологічні системи, оптимізація режимів, потокове моделювання, адаптивне управління, ефективність виробництва, аналіз даних*

Abstract. *This article focuses on the development of optimization methods for technological processes through the management of energy, material, and information flows. It proposes the creation of symbolic models for various operational modes of technological equipment and methods for setting optimal parameters for each type of flow. The main attention is directed towards the implementation of algorithms capable of precisely diagnosing the state of technological systems and automatically adjusting their operational parameters to maximize the efficiency of production processes. This holistic approach aims not only to increase overall productivity and improve the quality of the final product but also to reduce operational costs through intelligent process management based on detailed data analysis. Such an approach opens new horizons for the further development of automated control systems capable of effectively balancing between the complex interactions of different flows and adapting to production needs in real-time. The work emphasizes the importance of incorporating advanced technologies, such as machine learning and artificial intelligence, into technological processes to enhance adaptability and efficiency. Significant attention is given to the development of user interfaces that facilitate convenient setup and process control, as well as enable integration with other technological control systems within the enterprise. The described approach demonstrates that intelligent flow management can provide not only direct benefits for enterprise efficiency but also contribute to broader sustainable development goals, highlighting the potential for creating state-of-the-art adaptive control systems based on a deep analysis and understanding of technological processes.*

Keywords: *process optimization, technological systems, mode optimization, flow modeling, adaptive management, production efficiency, data analysis.*

Вступ.

В сучасних умовах розвитку машинобудівної галузі, коли ринкова ситуація характеризується постійним зростанням вимог до оновлення номенклатури складових технологічних систем та зменшенням серійності виробів, виникає гостра потреба у пошуку нових напрямів підвищення ефективності існуючих технологічних процесів [1,2,3]. Це ставить перед виробниками завдання не лише забезпечувати високий рівень адаптивності виробництва до змінних умов ринку, але й постійно оптимізувати технологічні процеси, з метою досягнення оптимальних показників якості виробництва [4].

Актуальність оновлення алгоритмів управління технологічними системами і режимами роботи обладнання в машинобудуванні випливає з необхідності забезпечення високої гнучкості виробничих ліній, ефективного використання ресурсів, зниження виробничих витрат і покращення екологічності процесів. У цьому контексті, використання інтегрованого підходу до аналізу та управління енергетичними, матеріальними та інформаційними потоками у технологічних процесах стає ключем до побудови ефективного та адаптивного виробництва.

Розвиток новітніх технологій, зокрема машинного навчання та штучного інтелекту, надає унікальні можливості для оновлення алгоритмів управління технологічними системами [5]. Ці технології дозволяють не тільки аналізувати великі обсяги даних і швидко адаптуватися до змін у виробничих процесах, але й передбачати потенційні проблеми та автоматично коригувати режими роботи обладнання для досягнення оптимальної продуктивності та якості виробів [6,7,8].

Таким чином, дана стаття розглядає актуальні питання оптимізації технологічних процесів у машинобудуванні з акцентом на необхідність оновлення управлінських алгоритмів в контексті зростаючих вимог до гнучкості, ефективності та екологічності виробництва, яке забезпечується комплексним підходом до аналізу та управління технологічними системами для досягнення ефективної адаптації до динамічних умов ринку та забезпечити високу якість виробництва.

Метою роботи є розробка комплексного підходу до оптимізації технологічних систем через аналіз та управління енергетичними, матеріальними та інформаційними потоками, спрямований на підвищення ефективності виробництва, зниження витрат і покращення якості продукції.

Виходячи з цього були поставлені наступні задачі роботи: розробити методику створення символьних моделей для різних режимів роботи технологічного обладнання; визначити умови оптимальності для ефективного використання енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків; розробити алгоритми для діагностики стану

Наукова новизна полягає у розробці інтегрованого підходу до потокового моделювання, що дозволяє одночасно оптимізувати енергетичні, матеріальні та інформаційні потоки в технологічних системах. Вперше запропоновано методику, що базується на використанні символьних моделей для аналізу та оптимізації режимів роботи обладнання, враховуючи умови оптимальності для досягнення максимальної ефективності.

Практична новизна виявляється в розробці системи адаптивного управління, яка може автоматично коригувати параметри роботи технологічного обладнання з метою оптимізації виробничих процесів та інтеграції сучасних технології машинного навчання і штучного інтелекту для ефективної адаптації до змінних умов виробництва, відкриваючи нові можливості для підвищення продуктивності та стійкості виробничих процесів.

Основна частина.

Передусім акцентуємо на критичній потребі розроблення класифікаційної системи для об'єктів виробничого процесу. Така система повинна охоплювати взаємодію між матеріальними, енергетичними, та інформаційними потоками, базуючись на принципах символьного моделювання. Основні елементи класифікації включають:

- функціональні елементи (ФЕ): являють собою ключові компоненти, задіяні в перетворенні матеріальних, енергетичних, або інформаційних потоків, класифіковані відповідно до типу перетворення (активне або пасивне) та виконавця (людина або машина);
- перетворення потоків: розгляд матеріальних, енергетичних, та інформаційних потоків у технологічних системах, де перетворення може бути активним (зміна вмісту) або пасивним (зміна стану без вмісту);
- моделі різних порядків: класифікація об'єктів за складністю та деталізацією, від простих до складних систем, що включають кілька процесів, для детального аналізу та оптимізації кожного аспекту технологічного процесу;
- взаємодія між ФЕ: аналіз способів взаємодії функціональних елементів та обміну потоками, із зосередженням на типах зв'язків між елементами для розуміння впливу інтеграції різних процесів на ефективність системи;
- структурні моделі: розробка моделей для відображення взаємодії ФЕ та процесів, включаючи як лінійні, так і складні з'єднання, які відтворюють реальну структуру дільниць і цехів.

Розробка такої системи класифікації надає комплексний інструментарій для аналізу та проектування механоскладальних технологічних об’єктів, забезпечуючи глибоке розуміння як технічних, так і організаційних аспектів технологічних процесів.

При розробці функціональних елементів (ФЕ) для механоскладальних технологічних об’єктів треба користуватися загальними принципами, враховуючи різноманітність потоків — матеріальних, енергетичних, інформаційних, а також методи їх перетворення. Функціональні елементи можна представити наступним чином:

- оператор-верстатник: ФЕ, що забезпечує безпосереднє управління металообробним верстатом або іншим виробничим обладнанням. Він перетворює інформаційні потоки, як-от технологічні інструкції та програми обробки, та енергетичні потоки — через мускульну силу або взаємодію з керуючими елементами обладнання, — у матеріальні потоки, змінюючи форму, розмір або властивості деталей;
- автоматизований транспортний засіб: ФЕ для переміщення заготовок або готових виробів між робочими станціями чи ділянками. Переважно виконує пасивне перетворення матеріального потоку, переміщаючи його без впливу на структуру чи властивості матеріалу;
- контрольно-вимірювальний прилад: ФЕ, що аналізує стан об'єктів, використовуючи інформаційний потік, отриманий унаслідок вимірювання фізичних параметрів. Він перетворює матеріальні потоки в інформаційні, надаючи дані для подальшого аналізу або прийняття рішень;
- металоріжучий верстат з ЧПУ: ФЕ, який автоматизує процес обробки матеріалів за допомогою програмних команд. Виконує активні преобразування матеріального потоку, модифікуючи форму, розміри або інші характеристики оброблюваної заготівки відповідно до заданих параметрів;
- Система управління виробництвом: ФЕ для координації дій усіх елементів виробничого процесу. Перетворює інформаційні потоки в управлінські рішення та інструкції, спрямовані на оптимізацію та синхронізацію роботи всіх складових системи.
- роботизована зварювальна станція: ФЕ, що автоматизує процес зварювання за допомогою програмованого робота. Реалізує активні перетворення матеріальних потоків, з'єднуючи деталі або елементи конструкції в єдине ціле за допомогою енергетичних потоків (наприклад, тепла від зварювання), змінюючи властивості матеріалів.

Описуючи функціональні елементи (ФЕ) механоскладальних технологічних дільниць і цехів у вигляді формул, що відображають потоки, можна використати наступну символіку та позначення:

- оператор-станочник ОС: $I \rightarrow E \rightarrow M$,

де I - вхідний інформаційний потік (технологічні інструкції, програми), E - енергетичний потік (мускульна сила або енергія для управління обладнанням), M - вихідний матеріальний потік (оброблена деталь).

- автоматизований транспортний АТЗ: $M\text{вх} \rightarrow M\text{вих}$,

де $M\text{вх}$ - вхідний матеріальний потік (заготівки або готові вироби), $M\text{вих}$ - вихідний матеріальний потік після переміщення.

- контрольно-вимірювальний прилад КВП: $M \rightarrow I$,

де M - матеріальний потік (об'єкти для вимірювання), I - вихідний інформаційний потік (дані вимірювань).

- металоріжучий верстат з ЧПУ МВЧ: $I + E + M\text{вх} \rightarrow M\text{вих}$,

де I - програмні команди, E - енергетичний потік для обробки, $M\text{вх}$ - вхідний матеріальний потік (заготівка), $M\text{вих}$ х - вихідний матеріальний потік (оброблена деталь).

- система управління виробництвом СУВ: $I\text{вх} \rightarrow I\text{управ} \rightarrow I\text{вих}$,

де $I\text{вх} \rightarrow$ - вхідний інформаційний потік (дані про виробництво), $I\text{управ} \rightarrow$ - управлінські рішення, $I\text{вих}$ - вихідний інформаційний потік до виконавчих ФЕ.

- роботизована зварювальна станція РЗС: $E + M\text{вх}1 + M\text{вх}2 \rightarrow M\text{вих}$,

де E - енергетичний потік (тепло від зварювання), $M\text{вх}1$ та $M\text{вх}2$ - вхідні матеріальні потоки (деталі для з'єднання), $M\text{вих}$ - вихідний матеріальний потік (з'єднані деталі).

Ці формули відображають базові принципи перетворення потоків у рамках кожного ФЕ: $(I\text{вх}, E\text{вх}, M\text{вх}) \rightarrow (I\text{вих}, E\text{вих}, M\text{вих})$, де: $I\text{вх}, E\text{вх}, M\text{вх}$ — вхідні інформаційні, енергетичні та

матеріальні потоки відповідно; Iвих, Eвих, Mвих— вихідні інформаційні, енергетичні та матеріальні потоки відповідно.

Базова модель перетворення енергетичних потоків, яка враховує перетворення загального потоку на корисний і загублений, може бути виражена наступною формулою:

$$E\text{вх} \rightarrow E\text{кор} + E\text{заг}, \quad (1)$$

де: Eвх — загальний вхідний енергетичний потік до функціонального елемента; Eкор— корисний енергетичний потік, який використовується для виконання роботи або прямого призначення в процесі; Eзаг — загублений енергетичний потік, який розсіюється в середовище або втрачається іншим чином без виконання корисної роботи.

Умова оптимальності використання енергетичних потоків у технологічних процесах може бути виражена через ефективність енергетичних перетворень. Ця умова базується на принципі мінімізації втрат енергії при одночасному максимумі використання корисного енергетичного потоку. Математично умову оптимальності можна описати наступним чином:

$$\frac{\Delta E\text{кор}}{\Delta E\text{заг}} = \frac{E\text{кор}}{E\text{заг}}, \quad (2)$$

де: ΔEкор — додана частина корисної енергії, що отримана в результаті цієї ж зміни; ΔEзаг — додана частина загальної енергії в результаті зміни впливаючого фактору; Eкор — кількість енергії, що була використана корисно; Eзаг — загальна кількість використаної енергії.

Таким чином, для будь-якого збільшення загального витрачання енергії в системі, з оптимальними показниками корисне використання цієї додаткової енергії повинно збільшуватись у тій самій пропорції. Умова оптимальності слугує важливим критерієм при проектуванні та оптимізації технологічних систем, зокрема, для вибору обладнання, режимів роботи та технологічних процесів. Вона дозволяє ідентифікувати точки, в яких подальше збільшення використання енергії не призведе до пропорційного зростання корисного ефекту, тим самим підкреслюючи значення ефективності використання ресурсів. Концепція ефективності використання енергії в технологічних системах та її оптимізація є предметом багатьох досліджень [9,10]. Загальноприйнятою метою є зниження втрат енергії та підвищення частки корисно використаної енергії, що відповідає ідеї зазначеної умови оптимальності [11,12]. Хоча це не є прямим аналогом умови оптимальності, цей підхід підкреслює важливість оптимізації використання енергії в технологічних процесах. Також, в інших джерелах акцентується на техніках оптимізації для підвищення енергетичної ефективності в енергосистемах, що також відображає стремління до максимально ефективного використання енергії та мінімізації енергетичних втрат.

Аналогічно, умова оптимальності перетворень матеріальних потоків в технологічних системах може бути визначена аналогічно до умови для енергетичних потоків, враховуючи ефективність використання вхідних матеріальних ресурсів та мінімізацію втрат матеріалів. Умову оптимальності можна виразити через співвідношення між вхідними, корисно використаними та втраченими (або перетвореними в відходи) матеріальними потоками. В цьому контексті, корисний вихід представляє собою матеріал, що був ефективно використаний у виробничому процесі, тоді як втрати означають некорисне використання або втрату матеріалу:

$$M\text{вх} \rightarrow M\text{кор} + M\text{втр}, \quad (3)$$

де: Mвх — загальний вхідний матеріальний потік; Mкор — корисно використаний матеріальний потік у виробництві; Mвтр — втрати матеріалу або його частина, яка перетворюється в відходи.

Умова оптимальності для матеріальних потоків формулюється таким чином, що для будь-якої зміни в технологічному процесі або впливаючому факторі, співвідношення між приростом загальних матеріальних витрат та приростом корисно використаної частини повинно зберігатися:

$$\frac{\Delta M\text{втр}}{\Delta M\text{кор}} = \frac{M\text{втр}}{M\text{кор}}. \quad (4)$$

Це означає, що оптимальність досягається, коли кожне додаткове вкладення матеріалу в процес призводить до пропорційного збільшення корисно використаного продукту, тобто ефективність перетворення матеріалів максимізується при мінімальних втратах.

Такий підхід дозволяє ідентифікувати потенційні точки для покращення в процесах обробки та використання матеріалів, направляючи зусилля на зниження втрат матеріалу та підвищення вихідної

якості та кількості готової продукції. У практичному плані це може означати оптимізацію виробничих параметрів, вдосконалення технологічних процесів, а також впровадження рециркуляції та повторного використання матеріалів, де це можливо.

Для представлення режимів роботи технологічних машин і верстатів при обробці заготівок у вигляді символьних моделей, ми можемо використовувати універсальну нотацію, що дозволяє зобразити основні параметри режиму роботи та їх вплив на процес обробки. Символьні моделі дозволяють узагальнити і структурувати інформацію про різні типи обробки, спрощуючи аналіз та оптимізацію процесів.

Символьні моделі режимів роботи:

- режими різання (R): $R(V, S, a) \rightarrow Q$,

де V — швидкість різання, S — подача, a — глибина різання; Q — якість обробки та продуктивність;

- режими шліфування (Ш): $\text{Ш}(V\text{ш}, \text{Аб}, \text{Ох}) \rightarrow Q\text{ш}$,

де Vш, — швидкість обертання шліфувального круга, Аб — тип абразиву, Ох — охолодження; Qш — якість шліфувальної обробки;

- режими фрезерування (Ф): $\Phi(V\text{ф}, S\text{ф}, a\text{ф}, \text{Тф}) \rightarrow Q\text{ф}$,

де Vф — швидкість обертання фрези, Sф — подача фрези, aф — глибина різання фрези, Тф — тип фрези; Qф— якість фрезерування;

- режими токарної обробки (Т): $\text{Т}(V\text{т}, S\text{т}, a\text{т}) \rightarrow Q\text{т}$,

де Vт — швидкість обертання заготівки, Sт, — подача інструменту, aт — глибина різання; Qт— якість токарної обробки.

Практичне Застосування: автоматизована виробнича лінія включає інтеграцію сенсорів та інтелектуальних систем управління для збору та аналізу даних про стан обладнання (R, Ш, Ф, Т) та заготівок. На основі аналізу інформації система автоматично коригує режими роботи машин для досягнення оптимальної продуктивності, мінімізації втрат енергії та матеріалів, а також забезпечення високої якості кінцевого продукту.

У виробничому середовищі, наприклад, на заводі з виготовлення металевих деталей, автоматизовані системи можуть використовувати дану модель для динамічної оптимізації режимів різання на токарних або фрезерних верстатах. Це включає:

- адаптацію до змінних умов обробки: автоматичне регулювання *V*, *S*, і a на основі вимірювань зносу інструменту, якості обробки поверхні та інших оперативних даних;
- енергетичну ефективність: оптимізація використання енергії через регулювання швидкості обертання та інших параметрів, що мінімізують енергоспоживання без втрати продуктивності;
- матеріальну ефективність: мінімізація відходів матеріалу та збільшення виходу корисної продукції через точне управління глибиною та швидкістю різання;
- оптимізацію інформаційних потоків: иикористання даних з датчиків та аналітичних інструментів для постійного вдосконалення режимів роботи, адаптації до змін у виробничому процесі.

Такий підхід дозволяє досягти оптимальної продуктивності при високій якості кінцевого продукту, одночасно знижуючи витрати на енергію, матеріали та збільшуючи загальну ефективність виробництва.

Глобальна ефективність виробничої системи може бути представлена через інтеграцію умов оптимальності для енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків, що враховують взаємозв'язки між різними типами ресурсів та процесами. Ця інтеграція дозволяє формувати універсальне бачення оптимізації виробництва, спрямоване на досягнення максимальної загальної продуктивності, ефективності та якості продукції.

Глобальна ефективність (*GE*) може бути виражена як функція, що максимізує корисне використання всіх потоків (*E*кор, *M*кор, *I*кор), при мінімізації загальних витрат (*E*заг, *M*заг, *I*заг):

$$GE = f\left(\frac{\Delta E\text{кор}}{\Delta E\text{заг}}, \frac{\Delta M\text{кор}}{\Delta M\text{заг}}, \frac{\Delta I\text{кор}}{\Delta I\text{заг}}\right) \rightarrow max\ . \quad (5)$$

Для досягнення глобальної ефективності, підприємства можуть впроваджувати комплексні системи управління виробництвом, які включають: оптимізацію використання енергетичних ресурсів через автоматизовані системи контролю та адаптації до змінних умов виробництва; мінімізацію втрат матеріалу через точне планування, вдосконалені технології обробки та рециклінг; використання передових систем аналізу даних та штучного інтелекту для покращення прийняття рішень та управління процесами.

Глобальна оптимізація потребує не лише вдосконалення внутрішніх процесів, але й гнучкої взаємодії з зовнішнім середовищем, адаптації до змін ринкових умов та врахування екологічних вимог. Цей підхід спрямований на створення високоефективного, стійкого та конкурентоспроможного виробництва.

Обговорення.

Оптимізація виробничих процесів на основі базової моделі перетворення потоків зосереджується на ключовому принципі: безперервне діагностування та коригування режимів роботи для забезпечення ефективності енергетичного використання. Основна умова оптимальності полягає в утриманні співвідношення між малими коливаннями корисної складової енергетичного потоку (ΔEкор) та відповідними коливаннями загального енергетичного потоку (ΔEзаг) на рівні співвідношення їх середніх абсолютних значень. Це потребує:

- використання сенсорів для моніторингу енергетичних потоків та автоматизованих систем управління дозволяє адаптувати параметри роботи обладнання в реальному часі, забезпечуючи оптимізацію енергоспоживання;
- застосування принципів енергетичного менеджменту та оптимізації для досягнення високого рівня ефективності виробництва, мінімізації енергетичних втрат та зниження виробничих витрат;
- збалансування енергетичних потоків не тільки сприяє зниженню витрат на енергію, але й підвищує загальну продуктивність завдяки ефективнішому використанню ресурсів.

На основі описаної моделі оптимізації та умов оптимальності потоків дійсно можна розробити універсальний прилад (або систему управління), який би здатний керувати різноманітними технологічними процесами і системами. Цей прилад міг би використовуватися для безперервного моніторингу, аналізу та корекції енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків з метою підтримки оптимального режиму роботи в реальному часі. Основні елементи приладу:

- інтегровані сенсори: для вимірювання енергетичних, матеріальних та інформаційних потоків. Сенсори збирають дані про споживану енергію, витрати матеріалів та ефективність інформаційних процесів;
- модуль аналізу даних: обробка даних від сенсорів з використанням алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для визначення оптимальних параметрів роботи;
- адаптивна система управління: автоматичне коригування параметрів роботи обладнання відповідно до аналізу даних для підтримки оптимальних режимів роботи;
- інтерфейс користувача: забезпечує зручний доступ до інформації про стан системи, дозволяє користувачам налаштовувати параметри і вносити корективи в процеси управління.

Розробка та впровадження універсального приладу або системи для оптимізації технологічних процесів на основі аналізу потоків може стати ключовим кроком до створення більш ефективних, економічних та екологічно стійких виробничих систем. Такий прилад може бути застосований в широкому спектрі галузей, від виробництва до енергетики та логістики, забезпечуючи оптимізацію споживання енергії у виробничих процесах; ефективне використання ресурсів, зниження кількості відходів; підвищення загальної продуктивності та якості кінцевого продукту, швидку адаптація до змін у виробничих умовах або вимогах до продукції.

Висновки.

Запропонований комплексний підхід до оптимізації технологічних систем, який інтегрує управління енергетичними, матеріальними та інформаційними потоками сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів, зниженню витрат і покращенню якості кінцевої продукції.

Введення методики створення символьних моделей для різноманітних режимів роботи технологічного обладнання дозволяє детально аналізувати та оптимізувати кожен аспект

технологічного процесу, забезпечуючи глибше розуміння взаємодії різних потоків і процесів виробництва.

Розроблені алгоритми для точної діагностики стану технологічних систем і автоматичної адаптації їх робочих параметрів сприяють максимізації ефективності виробництва шляхом оптимального використання ресурсів і адаптації до змін умов виробництва.

Підкреслено значення інтеграції передових технологій, таких як машинне навчання та штучний інтелект, у технологічні процеси, що дозволяє підсилити адаптивність і ефективність виробництва. В цьому контексті приділено увагу розробці користувацьких інтерфейсів, що сприяють зручному налаштуванню та контролю процесів і надає можливість інтеграції з іншими технологічними системами управління на підприємстві.

Наголошено на потенціалі для створення новітніх систем адаптивного управління, заснованих на глибокому аналізі та розумінні технологічних процесів, що може значно підвищити ефективність і адаптивність виробництва, а інтелектуальне управління потоками не лише забезпечує безпосередні вигоди для ефективності підприємства, але й вносить вклад у ширші цілі сталого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yussuf R. O., Asfour O. S. Applications of artificial intelligence for energy efficiency throughout the building lifecycle: An overview // Energy and Buildings. – 2024. – Vol. 305. – Art. 113903. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113903.
2. Yang J., Jiang Z., Zhu S., Zhang H. Data-driven technological life prediction of mechanical and electrical products based on Multidimensional Deep Neural Network: Functional perspective // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 64. – P. 53-67. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.05.014.
3. Yoruk E., Radosevic S., Fischer B. Technological profiles, upgrading and the dynamics of growth: Country-level patterns and trajectories across distinct stages of development // Research Policy. – 2023. – Vol. 52, Issue 8. – Art. 104847. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104847.
4. Malakizadi A., Mallipeddi D., Dadbakhsh S., M'Saoubi R., Krajnik P. Post-processing of additively manufactured metallic alloys – A review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2022. – Vol. 179. – Art. 103908. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103908.
5. Gunasegaram D.R., Barnard A.S., Matthews M.J., Jared B.H., Andreaco A.M., Bartsch K., Murphy A.B. Machine learning-assisted in-situ adaptive strategies for the control of defects and anomalies in metal additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 81. – Art. 104013. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104013.
6. Basak S., Baumers M., Holweg M., Hague R., Tuck C. Reducing production losses in additive manufacturing using overall equipment effectiveness // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 56. – Art. 102904. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102904.
7. Bründl P., Scheck A., Nguyen H. G., Franke J. Towards a circular economy for electrical products: A systematic literature review and research agenda for automated recycling // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2024. – Vol. 87. – Art. 102693. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102693.
8. Yucesan Y. A., Dourado A., Viana F. A.C. A survey of modeling for prognosis and health management of industrial equipment // Advanced Engineering Informatics. – 2021. – Vol. 50. – Art. 101404. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101404.
9. Azarnia M., Rahimiyan M., Siano P. Offering of active distribution network in real-time energy market by integrated energy management system and Volt-Var optimization // Applied Energy. – 2024. – Vol. 358. – Art. 122635. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122635.
10. Möhring H.-C., Wiederkehr P., Erkorkmaz K., Kakinuma Y. Self-optimizing machining systems // CIRP Annals. – 2020. – Vol. 69, Issue 2. – P. 740-763. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.007.
11. Olabi A.G., Wilberforce T., Obaideen K., Sayed E.T., Shehata N., Alami A.H., Abdelkareem M.A. Micromobility: Progress, benefits, challenges, policy and regulations, energy sources and storage, and its role in achieving sustainable development goals // International Journal of Thermofluids. – 2023. – Vol. 17. – Art. 100292. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100292.
12. Nowak A.M., Snow S., Horrocks N., Glencross M. Micro-climatic variations and their impact on domestic energy consumption – Systematic literature review // Energy and Buildings. – 2022. – Vol. 277. – Art. 112476. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112476.

***Ковалевський Сергій Вадимович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м.Краматорськ-Тернопіль, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.*

***Kovalevskyy Sergiy V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies and Management at the Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.*