

**С.В. Ковалевський, д.т.н., проф.
О.С. Ковалевська, к.т.н., доц.
Д.М. Сидюк, аспірант**

Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна

Комплексне управління життєвим циклом виробів машинобудування

Досліджено моделювання та емуляцію як ключові підходи підтримки етапів життєвого циклу машинобудівного заводу з моменту проєктування, впровадження та експлуатації до етапу оптимізації існуючої системи. Показано, що емуляційна модель, створена на базі конструктивних компонентів виробництва, є важливим інструментом для стратегічних рішень та побудови структури підприємства на початковому етапі проєктування. Це дозволяє створити адаптивну систему до розвитку та оптимізації як її окремих компонентів, так і структури побудови. Новий підхід до впровадження програмного забезпечення управління виробництвом Manufacturing Execution System (MES) за допомогою емуляційної моделі дозволяє ефективно тестувати та вдосконалювати його перед фактичним впровадженням, що дає можливість як знизити ризики з несправності теоретичної моделі у практичному виконанні, так і протестувати декілька можливих варіантів, що дозволяє зменшити загальні ресурсні витрати на перевірку декількох варіантів. Описано інноваційний підхід до навчання персоналу з використанням «майже живого» навчального середовища. Це дозволяє спростити процеси оптимізації виробничого середовища саме по відношенню до персоналу та структури управління підприємством. Зазначено важливість системного підходу до навчання операторів, а також впровадження емуляційного підходу для покращення роботи машинобудівного заводу на етапах використання та оптимізації. Визначені перспективи та шляхи впровадження принципу емуляційних моделей та програмного забезпечення управління виробництвом (MES) у життєвий цикл машинобудівного виробництва.

Ключові слова: машинобудівний завод; життєвий цикл; емуляція; моделювання; впровадження; програмне забезпечення управління виробництвом (MES); навчання персоналу; оптимізація.

Вступ. Сучасна промисловість машинобудування переживає період значних трансформацій, прискореного технологічного розвитку та стрімко зростаючих вимог з боку споживачів [1, 2]. Цей етап вимагає глибокого й основного аналізу та вдосконалення управлінських підходів, спрямованих на керування життєвим циклом виробів [3, 4, 5]. Комплексне управління життєвим циклом виробів у машинобудуванні необхідне для забезпечення високої якості, ефективності та конкурентоспроможності продукції [6]. Це враховує не тільки виробництво, але й стратегічне планування, розробку, впровадження нових технологій, а також відновлення та рециклінг. У цьому контексті дуже важливі не лише основні аспекти комплексного управління життєвим циклом виробів у машинобудуванні, а й поглиблений аналіз сучасних викликів та можливостей, що стоять перед промисловістю [7]. Тому треба розглядати методи та інструменти, що дозволяють ефективно керувати усіма етапами життєвого циклу виробу з метою забезпечення найвищої якості та відповідності вимогам сучасного ринку [8].

Актуальність теми. Життєвий цикл машинобудівного заводу містить чотири важливі етапи: проєктування, впровадження, експлуатацію та оптимізацію. Моделювання та емуляція є ключовими підходами для забезпечення їх успіху. Ключові стратегічні рішення та прогнозовані показники продуктивності, такі як інфраструктурні плани, обсяг та типи виробничого обладнання, а також вплив алгоритмів оптимізації, мають надаватися керівництву заводу на початковому етапі проєктування, що враховує створення продукту – імітаційної моделі, яка відтворює машинобудівний завод з реалістичним поданням усіх наявних на ринку виробничих систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Задля прийняття рішень щодо доцільності запуску побудови виробництва необхідно шукати шляхи розрахунку та підтвердження показників продуктивності. Саме для цього потрібно розглядати та застосовувати різні варіанти перевірки показників виробництва. Після прийняття стратегічних рішень на основі прогнозних значень, отриманих за допомогою моделювання, проєкт розробки має переходити до фази впровадження. Цей етап враховує будівельні роботи, закупівлю виробничого обладнання і впровадження програмної системи управління виробництвом Manufacturing Execution System (MES) [9]. MES – це програмне забезпечення (ПЗ), що задовольняє потреби у плануванні, навантаженні та контролі виробничого обладнання у виробництві. Це ПЗ відповідає за точну координацію операцій всередині заводу. Таким чином, воно є невід’ємною частиною виробничих операцій, забезпечуючи їхню надійність та ефективність. Впровадження MES завжди було викликом для машинобудівної галузі. Цей виклик створює нову можливість тестування MES перед його фактичним

впровадженням на заводі. Можливо застосувати підхід, що полягає у використанні тієї ж імітаційної моделі, що використовувалася на етапі проектування, з реальною MES замість модельованої. Це веде до створення системи, що поєднує в собі симуляцію фізичних процесів на машинобудівному заводі та реальне програмне забезпечення для управління виробництвом (MES). Головною метою цієї комбінованої (емульованої) системи є перевірка функціональності MES. Успішність застосування емуляційного підходу для тестування MES надає можливість позбутися помилок та проблем з продуктивністю перед його запровадженням на реальному заводі, зменшивши загальну вартість впровадження.

Наступним етапом є безпосередній процес будівництва машинобудівного комплексу. Ця фаза є ключовою для досягнення успішного впровадження та оптимізації заводу [10]. Важливим елементом цього процесу є навчання персоналу, який буде працювати з системою управління виробництвом. Для вирішення цих проблем треба розробити і впровадити інноваційний підхід – використання навчального середовища «майже живого», яке поєднує реальну систему управління виробництвом з віртуальним машинобудівним заводом у середовищі емуляції.

Мета використання нового підходу полягає в забезпеченні якісного навчання операторів та персоналу заводу. Вміння ефективно використовувати систему управління для планування та керування обладнанням є важливим елементом для досягнення продуктивної та ефективної роботи машинобудівного заводу.

Сучасна система управління може містити багато опцій та функцій для коригування рішень, що стосуються планування та диспетчеризації. Однак використання цих можливостей потребує спеціальних знань та навичок. Потрібно впровадити системний підхід до навчання, який базується на емуляції та дозволяє оцінювати продуктивність оператора. Цей підхід допомагатиме визначити вплив навчання та змінених підходів до роботи на ефективність планування та контролю на заводі.

Етап використання системи управління в реальному часі вимагає від операторів великої кількості знань та рішень [11]. Операторам доводиться працювати зі складними опціями та алгоритмами для вирішення завдань стратегічного планування та диспетчеризації. Однак через велику кількість змінних та ризик негативного впливу на роботу системи потрібна особлива обережність.

Використання емуляційного підходу дозволяє налаштувати параметри та алгоритми системи управління для оптимізації роботи машинобудівного заводу. Підхід до оптимізації полягає в налаштуванні параметрів та алгоритмів не в реальному часі, а в ізольованому середовищі. Це дає можливість здійснювати ефективний аналіз та налаштування, що покращує роботу заводу.

Кожен етап життєвого циклу машинобудівного заводу потребує індивідуального підходу та оптимізації.

Метою статті є дослідження машинобудівного виробництва з точки зору етапів життєвого циклу, можливості їх оптимізації та автоматизації. Зокрема, важливим є розглядання оптимізації як окремого етапу циклу, оскільки порівняно з класичним життєвим циклом виробу оптимізація не дорівнює етапу ремонту, у якому потрібно компенсувати втрачені ресурси, а є органічним процесом розвитку та шляхом адаптації до змінних вимог ринку. Задля цього виконується дослідження доцільності впровадження симуляцій та емуляційного процесу на різних етапах життєвого циклу як інструменту оптимізації.

Викладення основного матеріалу.

1. Дизайн машинобудівних виробів

Процес розробки машинобудівних виробів має складатися з двох ключових етапів: конструювання вузлів та розробка системи технологічної обробки.

У процесі розробки машинобудівних виробів першим кроком є визначення геометричних параметрів деталей (розмірів вузлів) з урахуванням технічних вимог, які впливають на вирішення, такі як необхідна міцність, рівень точності, тип матеріалу, коефіцієнт безпеки, функціональні вимоги, сезонні варіації тощо. Усі ці технічні характеристики мають певний рівень невизначеності, тому важливо виконати аналіз впливу змін на результат за допомогою чутливого аналізу.

Для досягнення геометричних параметрів, які задовільняють технічні вимоги і передбачені характеристики виробу, потрібно провести аналіз часу виготовлення деталей, загальної продуктивності виробництва та розміщення обладнання на обробці (довжина обробних ліній, кількість верстатів, загальна продуктивність виробництва). Для цього важливим етапом є моделювання виробничого процесу, яке дозволяє враховувати ефективність використання машин, розташування робочих місць та оптимізацію виробничого потоку.

Після визначення геометричних параметрів переходимо до більш детального етапу – проектування системи технологічної обробки. Метою цього етапу є розробка конфігурації та планування типів обладнання для різних операцій. На цьому етапі важливо враховувати кількість обробних верстатів та підйомно-транспортного обладнання. Це досягається через аналіз різних логістичних концепцій, які враховують спосіб обробки виробів у процесі виробництва, розміщення на складах (стратегії складування) та типи обладнання.

Питання ефективного використання простору на площадці виробництва є однією з ключових проблем, що розглядаються, оскільки воно впливає на вибір різних типів обробки. Оскільки різні технологічні

процеси, такі як обробка на верстатах, роботизована обробка, обробка на гідрокопіювальних верстатах чи CNC-верстатах, мають різну щільність розташування та вимоги до горизонтального переміщення виробів, то загальна продуктивність виробництва може варіюватися від певної кількості виробів. З метою системного аналізу різних можливих варіантів виробництва доцільно створити спеціалізовану бібліотеку моделювання машинобудівної продукції, яка надає змогу детально вивчити різні типи технологічного обладнання та операцій. Ця бібліотека симуляцій машинобудівного виробництва може мати назву «машина симуляції».

Кожна деталь машинобудівного виробу, враховуючи його вузли, обробне обладнання та роботи, треба ретельно відтворити у моделі з метою отримання реалістичного та вірогідного уявлення про дійсний машинобудівний виріб.

Дослідники і виробники активно використовували моделювання для покращення продуктивності машинобудівних виробів, але, зазвичай, фокусувалися на вирішенні окремих проблем, таких як ефективність обробки виробів, оптимальне розташування робочих зон, вибір обладнання тощо. Основні обмеження використання моделювання полягали в комерційній складності розробки деталізованих бібліотек, які охоплювали б широкий спектр машинобудівних виробів.

Теоретичні результати, отримані дослідницьким співтовариством, мають велике значення для комерційного сектору. Ці результати надаватимуть уявлення та підходи для покращення продуктивності та оптимізації машинобудівної продукції. Комерційні компанії, які мали можливість і бюджет для застосування та перевірки цих теоретичних підходів на практиці, здебільшого використовують пакети моделювання FlexTerm, Scusy та інші, щоб отримати практичний результат.

Інші комерційні сторони активно пропонують консультаційну підтримку для машинобудівних виробів, використовуючи пакети моделювання, такі як FlexTerm і Scusy. Важливо зазначити, що, хоча створення деталізованих бібліотек для всіх типів машинобудівних виробів є витратним та складним процесом, теоретичні результати, отримані дослідниками, роблять значний внесок у підвищення ефективності та якості машинобудівної продукції.

Зараз моделювання вже стало невід'ємною частиною машинобудівного виробництва, і воно допомагає підвищувати продуктивність, ефективність та якість машинобудівних виробів завдяки точним аналізам, оптимізації та практичній перевірці різних стратегій та рішень.

2. Етап впровадження

Підприємства, що спеціалізуються на розробці програмного забезпечення, почали активно розробляти операційні системи для машинобудівних виробів (TOS). За короткий час це програмне забезпечення, яке замінило величезний обсяг документації і забезпечувало операційну діяльність виробництва, стало важливим і критичним компонентом для машинобудівних підприємств.

Впровадження нових TOS у машинобудівному виробництві завжди було складним завданням на етапі впровадження, оскільки очікування від виробництва та якості TOS не завжди відповідали один одному. В цьому контексті є необхідність використання імітаційної моделі для перевірки функціональності TOS перед його реальним впровадженням. Імітаційна модель машинобудівного виробництва, яка використовувалася для дизайну та проектування, виявилася відмінним вибором для подальшої еволюції. Саме тут реалізується ідея повного віртуального машинобудівного виробництва, що містить моделі машин, обладнання, операцій та діяльності.

Такий підхід дозволив провести глибоке тестування та оцінку якості систем TOS. Порівняно з традиційними методами, які базувалися на запрограмованих сценаріях, обмежених окремими операціями або обладнанням, емуляційний підхід вимагає більш комплексних тестових сценаріїв, але забезпечує повністю інтегровану перевірку взаємодії між різними компонентами виробництва. Незважаючи на складність, цей підхід виявляється надзвичайно цінним для виявлення та виправлення помилок. До того ж віртуальний виробничий процес надає змогу отримати ключові показники продуктивності, такі як ефективність обладнання та час очікування, що стало значущим аспектом оцінки ефективності машинобудівних операцій.

Цей підхід до емуляції виявився дуже перспективним, незважаючи на його обмежену популярність на той момент. Ідея використання віртуальних середовищ для тестування TOS виявилася значущою для підвищення якості та ефективності машинобудівного виробництва.

3. Експлуатація машинобудівних виробів

Після випробування TOS наступним етапом для машинобудівних виробів є їх впровадження у реальну експлуатацію. Перед цією подією персонал, що займається машинобудівною продукцією, має пройти навчання з використання TOS. Основна мета навчання полягає в забезпеченні більш високої продуктивності завдяки передачі операторам практичних знань та досвіду використання системи. Це допомагає вдосконалити навички прийняття рішень та планування для окремих операторів. Проте найбільш важливим викликом є забезпечення того, що оператори можуть приймати вагомі рішення, не порушуючи нормальний ритм роботи. Щоб подолати цей виклик, треба розробити та застосувати ігрову навчальну платформу віртуальної реальності, яка демонструє вищу ефективність порівняно зі

стандартними методами навчання. Це також повністю усуває ризики, пов'язані зі звичайними навчальними методами.

Більшість навчання, що проводиться для машинобудівних виробів, зазвичай поділяється на дві категорії: звичайне навчання та навчання на робочому місці. Звичайне навчання містить лекції, вивчення підручників або їх комбінацію. Матеріали навчання можуть надаватися персоналом машинобудівного виробництва або виробником TOS. Незважаючи на популярність цього підходу, звичайний тип навчання не завжди може адекватно відобразити складність реальної системи, оскільки він фокусується на окремих аспектах та ігнорує взаємодію між різними компонентами. Цей підхід, за своєю статичною природою, має обмеження відповідно до динамічного та складного середовища, яке зустрічається в реальних умовах.

Деякі галузі освіти вже використовують новий тип навчання, який комбінує педагогіку та елементи ігор, використовуючи віртуальну реальність. Цей метод, який набуває популярності в галузі оборони та медицини, містить серйозне ігрове навчання, де знання та навички отримуються в середовищі, що наближене до реального, та застосовуються на практиці. Ця сполучена ігрова та педагогічна модель використовує імітаційні моделі, які поглиблюють навчальний процес у симульованому середовищі, що точно відтворює реальні робочі умови. Незважаючи на те, що використання віртуальної реальності для навчання не є новим явищем, воно залишається інноваційним підходом для машинобудівних виробів.

Цікавим є той факт, що більш висока продуктивність обладнання не завжди вказує на коротший час обороту, оскільки розподіл роботи між різними вузлами виробництва (використовувалися до чотирьох робочих машин) визначає, скільки часу потрібно для виконання виробничого процесу.

Такий підхід навчання надає можливість об'єктивно оцінити та безпечно тестувати нові методи. У цьому конкретному випадку – для планування виробництва машинобудівних вузлів. Дослідження чітко свідчать про те, що запропонований підхід імітації дійсно забезпечує безпечний і витратно-ефективний метод тестування та налаштування TOS та навчання операторів на віртуальному емульованому верстаті.

4. Оптимізація експлуатації виробів

На етапі оптимізації експлуатації виробів можна створити два підходи до оптимізації: налаштування параметрів TOS і перевірка плану.

4.1. Налаштування параметрів TOS

Основу системи управління виробництвом (СУВ) становлять модулі планування, організації та диспетчеризації. Ці важливі елементи враховують багато параметрів, які важливо належним чином налаштувати для досягнення оптимальної продуктивності на заводі. Постачальники СУВ зазвичай попередньо конфігурують ці параметри, і через їх складність та потенційні ризики рідко здійснюють їх зміни оператори. Проте взаємодія з цими параметрами під час виробничого процесу може впливати на безпеку та ефективність. Така ситуація відкриває нові виклики для впровадження емуляційних та модельних підходів: налаштування параметрів СУВ в імітованому віртуальному середовищі. Налаштування параметрів та алгоритмів СУВ може бути виконане в режимі оптимізації, який відбувається не в реальному часі, а у контрольованому віртуальному середовищі.

Оптимальні стратегії організації виробництва допомагають розташувати деталі та вузли у найбільш вигідних місцях. Це може призвести до зменшення кількості пересувань і змін у процесі виробництва, тим самим підвищити ефективність використання робочого простору та загальну продуктивність.

На підставі аналізу різних сценаріїв, у кожному з яких можуть бути внесені зміни в параметри виготовлення згідно з конкретними аспектами, такими як: навантаження на вузол (наприклад, збільшення / зменшення впливу змінних, пов'язаних із вузлом), розмірів зв'язків між вузлами (наприклад, збільшення / зменшення розміру штрафів, пов'язаних із відстанню між вузлами у виробництві), конкретних параметрів виробу (наприклад, неможливість поєднання деяких деталей або необхідність пересування виробів). Для кожного сценарію може бути проведено серію експериментів, щоб вивчити, які аспекти найбільше впливають. Можливо дійти висновку, що за правильного налаштування параметрів стратегія контрольованого випадкового виробництва дійсно може бути оптимальним вибором, оскільки вона сприяє підвищенню продуктивності як окремих вузлів, так і всього виробничого процесу, що приведе до покращень (збільшення на 5–10 %) продуктивності окремих вузлів, використовуючи функціональні можливості спеціалізованого програмного забезпечення для оптимізації виробництва.

4.2. Перевірка плану

Після аналізу бізнес-аналітиками оптимальних параметрів технологічних операцій за допомогою методів емуляції ці налаштування можна впровадити у реальний виробничий процес, де вони будуть застосовані до доступних систем у реальному часі. Починаючи з цього моменту та до моменту надходження виробів до виробничого цеху, планувальник виробництва матиме можливість створювати плани для робочих змін (плани виробництва, плани обладнання), тоді як виокремлена система управління виробництвом буде відповідальна за належне планування та розподіл ресурсів з використанням нових налаштувань. Планування робочої зміни буде містити послідовність обробки (виготовлення та складання) деталей, заплановане розташування виробів на майданчику та використання виробничого обладнання. Для досягнення високої продуктивності та забезпечення виконання виробничих графіків з мінімальними

витратами дуже важливо визначити оптимальну кількість активованого обладнання. Важливо не лише визначити кількість активованих, але також визначити їх розташування, і це, як деталі будуть переміщуватися та монтуватися у приміщенні, є ключовим для забезпечення ефективності виробничого процесу. Щоб сформулювати належний план робочої зміни, планувальнику слід детально дослідити всі зазначені аспекти та вчасно приймати важливі рішення у відведений обмежений час. На сьогоднішній день немає доступних інструментів для перевірки та оцінки якості такого плану; все залежить від професійного досвіду планувальника. Відсутність можливості виконати перевірку та оцінку якості цього плану потребує запровадити інноваційний підхід до моделювання, який може мати назву «перевірка плану». Цей підхід спрямований на надання планувальникам інструменту для прийняття обґрунтованих рішень щодо вибору перевіреного плану виробництва в обмежені строки.

Використання віртуальної моделі машинобудівних виробів дозволяє значно прискорити процес тестування залежно від розміру та складності виробництва. Однак для досягнення вищої швидкості у моделюванні, необхідна точна синхронізація часу між віртуальною моделлю та реальним виробництвом. Використання нового спеціалізованого методу допоможе забезпечити синхронізацію, але важкі обчислення та фіксовані часові цикли викликати будуть непередбачувану поведінку у виробничих процесах. Через це швидкість моделювання може стати критично важливою, з огляду на обмежений час для планування та прийняття рішень.

Архітектура системи виробництва має три ключові компоненти: модуль даних, модуль бізнес-логіки та модуль комунікації. Модуль даних забезпечує зберігання інформації, необхідної для планування та виробництва. Модуль бізнес-логіки містить алгоритми планування та керування виробничими процесами. Модуль комунікації відповідає за зв'язок з обладнанням та іншими системами. Для побудови імітаційної моделі системи виробництва необхідно ретельно розглянути ці компоненти. Практичний приклад розглядає використання реальної системи виробництва (у режимі емуляції) та модельованої системи (перевірка плану). Швидкість моделювання підтверджує важливі можливості, але виникає питання ефективності подання результатів для планувальника з метою вдосконалення плану. У свою чергу для досягнення цього доцільно використовувати два підходи: докладну статистику та візуалізацію. Використання статистичного аналізу допомагає виявляти проблеми продуктивності та знаходити шляхи їх вирішення. Візуалізація враховує докладне зображення процесів виробництва та розташування виробів.

Наведений вище цикл навчання з використанням перевірки деталей піддається послідовним крокам, які можуть здійснити інженери-конструктори виробів, які спрямовані на підвищення ефективності. Крім того, інженери мають можливість здійснити вдосконалення протягом обмеженого часу до виготовлення продукту.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У статті розглянуто чотири фази життєвого циклу машинобудівних виробів: проектування, впровадження, експлуатація та оптимізація. Моделювання та симуляція виявилися ефективними інструментами для досягнення успіху на кожному з цих етапів. Таким чином, технологічний прогрес і інновації впливають на розвиток машинобудівних виробів, роблячи їх більш ефективними та адаптованими до змін у ринкових умовах. Впровадження нових технологій, таких як автоматизація, аналіз даних, машинне навчання та штучний інтелект дозволяє вдосконалювати процеси виробництва і забезпечувати конкурентоспроможність продукції.

Перевірка плану виробництва є чудовим методом для оптимізації, який застосовується у реальному часі, сприяючи ефективній організації роботи під час створення плану виробництва. Після підтвердження відповідності плану виробництва та готовності його реалізації необхідність у подальшій перевірці тимчасово відпадає, доки якість нового плану виробництва не буде знову перевірена. Незважаючи на важливість перевірки плану виробництва для поліпшення якості планування, під час роботи можуть виникнути непередбачені ситуації.

Такі приклади містять відмови в роботі обладнання, затримки у доставці компонентів або навіть несподівану зміну в роботі виробничої системи, що може вплинути на початково задуманий результат планування. З метою попередження подібних ризиків пропонується підхід, який забезпечує неперервну підтримку у реальному часі.

Запропонований підхід базується на використанні імітаційних моделей, які аналізують актуальні дані з виробничого процесу і виконують експерименти швидше, ніж сам виробничий процес, тим самим забезпечуючи постійний зворотний зв'язок користувачеві щодо очікуваного результату. Ця взаємодія реалізована за допомогою циклу зворотного зв'язку: імітаційна модель використовує актуальні дані для створення симуляції, результати якої передаються користувачу. Користувач у свою чергу коригує реальні дані, які надалі стають новими вхідними даними для імітаційної моделі. Використовуючи такий цикл зворотного зв'язку, користувач отримує можливість порівнювати цей підхід для попереднього огляду майбутнього, забезпечуючи при цьому безперервну підтримку під час процесу прийняття рішень на основі останніх результатів імітаційного моделювання.

Після завершення користувачем перевірки плану його обладнання готове до використання в реальних умовах. Однак під час роботи в реальному середовищі, обладнання постійно взаємодіє з навколишнім

середовищем, що призводить до постійної зміни даних. Запропонований підхід передбачає отримання актуальної копії цих даних для використання в симуляційній моделі. Ця модель аналогічна тій, яка використовувалася для перевірки плану, і може використовуватися для проведення експериментів. Якщо під час симуляції виникають непередбачені ситуації, наприклад, блокування обладнання або великі затримки, падіння продуктивності або перевантаження певних зон, користувач отримує сповіщення та може вживати корекційних заходів у реальному часі.

Важливо зауважити, що дані, отримані з симуляції, не гарантують точних результатів у реальних умовах, але надають можливість аналізувати й адаптувати дії відповідно до змін у робочому середовищі.

Такий інноваційний підхід, що дозволяє використовувати симуляційну модель для оптимізації роботи машинобудівних виробів у реальному часі, є перспективним та цінним. Його можна застосовувати для ефективного управління різноманітними етапами життєвого циклу виробництва.

References:

1. Andersen, A.D. and Gulbrandsen, M. (2020), «The innovation and industry dynamics of technology phase-out in sustainability transitions: Insights from diversifying petroleum technology suppliers in Norway», *Energy Research & Social Science*, Vol. 64, 101447 p., doi: 10.1016/j.erss.2020.101447.
2. Ahn, S.J. (2020), «Three characteristics of technology competition by IoT-driven digitization», *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 157, 120062 p.
3. Benitez, G.B., Ferreira-Lima, M., Ayala, N.F. and Frank, A.G. (2022), «Industry 4.0 technology provision: the moderating role of supply chain partners to support technology providers», *Supply Chain Management: An International Journal*, No. 27 (1), pp. 89–112.
4. Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A. et al. (2020), «Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review», *International Journal of Production Research*, Vol. 58, No 6, pp. 1662–1687.
5. Ceipek, R., Hautz, J., Petruzzelli, A.M. et al. (2021), «A motivation and ability perspective on engagement in emerging digital technologies: The case of Internet of Things solutions», *Long Range Planning*, Vol. 54, No. 5, 101991 p.
6. Kokare, S., Oliveira, J.P. and Godina, R. (2023), «Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review», *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 68, pp. 536–559, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.05.007.
7. Leng, J., Sha, W., Wang, B. et al. (2022), «Industry 5.0: Prospect and retrospect», *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 65, pp. 279–295, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.09.017.
8. Vickram, A.S. and Vidhya Lakshmi, S. (2023), «Advancements in Environmental Management Strategies and Sustainable Practices for Construction Industry: A Comprehensive Review», *SSRG International Journal of Civil Engineering*, Vol. 10, Issue 8, pp. 10–22, doi: 10.14445/23488352/IJCE-V10I8P102.
9. Oviedo-Ocaña, E.R., Abendroth, C., Domínguez, I.C. et al. (2023), «Life cycle assessment of biowaste and green waste composting systems: A review of applications and implementation challenges», *Waste Management*, Vol. 171, pp. 350–364, doi: 10.1016/j.wasman.2023.09.004.
10. Reisinger, J., Zahlbruckner, M.A., Kovacic, I. et al. (2022), «Integrated multi-objective evolutionary optimization of production layout scenarios for parametric structural design of flexible industrial buildings», *Journal of Building Engineering*, Vol. 46, 103766 p., doi: 10.1016/j.jobe.2021.103766.
11. Frantzén, M., Bandaru, S. and Ng, A.H.C. (2022), «Digital-twin-based decision support of dynamic maintenance task prioritization using simulation-based optimization and genetic programming», *Decision Analytics Journal*, Vol. 3, 100039 p., doi: 10.1016/j.dajour.2022.100039.

Ковалевський Сергій Вадимович – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри Інноваційних технологій і управління ДДМА.

<https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>.

Наукові інтереси:

- моделювання технологічних систем і процесів;
- спеціальні методи обробки матеріалів;
- інноваційні технології машинобудування.

Ковалевська Олена Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обробки металів тиском ДДМА.

<https://orcid.org/0000-0001-5884-0430>.

Наукові інтереси:

- моделювання технологічних систем і процесів;
- спеціальні методи обробки матеріалів;
- інноваційні технології машинобудування.

Сидюк Дар'я Миколаївна – аспірант кафедри Інноваційних технологій і управління ДДМА.

<https://orcid.org/0000-0003-0516-6694>.

Наукові інтереси:

- CALS-технології;

- діагностика технологічних систем і процесів;
- інноваційні технології машинобудування.

Kovalevskyy S.V., Kovalevska O.S., Sydiuk D.M.

Integrated lifecycle management of engineering products

This article explores modeling and emulation as pivotal approaches to assist the life cycle stages of a machine-building plant, from design and implementation to operation and existing system optimization. It demonstrates that an emulation model, constructed based on the production constructive components, serves as a crucial tool for strategic decision-making and enterprise structure development at the initial design stage. This enables the creation of an adaptive system for growth and optimization of both its individual components and structural framework. The novel approach to implementing Manufacturing Execution System (MES) production management software through an emulation model allows for effective testing and refinement before actual deployment. This reduces the risks associated with discrepancies between theoretical and practical models and permits the testing of multiple potential scenarios, thereby lowering overall resource costs for evaluating various options. The article also describes an innovative training approach for personnel using an "almost live" educational environment, simplifying the optimization processes of the production environment, particularly in relation to staff and enterprise management structure. The significance of a systemic approach to operator training is emphasized, along with the implementation of an emulation approach for optimizing the operation of the machine-building plant during utilization and optimization stages. The prospects and avenues for integrating the principle of emulation models and Manufacturing Execution System (MES) software into the life cycle of engineering production are outlined.

Keywords: machine-building plant; life cycle; emulation; modeling; implementation; Manufacturing Execution System (MES) software; personnel training; optimization.

Стаття надійшла до редакції 18.09.2023.