

Мехович Сергій Анатолійович, д.е.н., професор кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, +38(050)402-62-12, sm261245@gmail.com, ORCID ID:0000-0001-7080-7609

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Труш Євген Вікторович, аспірант PhD кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, +38(098)380-17-33, evgentrush80@gmail.com

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Потапов Федір Вікторович, інженер-конструктор, аспірант кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, +38(068)307-38-43, potarovf333@gmail.com

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО КОНСТРУЮВАННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Анотація. У статті запропоновано концепцію економічного механізму управління якістю конструкторської діяльності в умовах інтелектуалізації інженерних процесів. Зростання складності технічних систем, необхідність скорочення циклу розробки продукції, підвищення вимог до інноваційності та швидкості технологічного оновлення обумовлюють потребу у формуванні нової економічної парадигми інженерної діяльності. У цих умовах конструкторська діяльність перестає бути локальним процесом створення конструкторської документації та трансформується у складну багаторівневу систему управління цифровими інженерними знаннями протягом усього життєвого циклу виробу. Зазначено, що традиційна модель конструкторської діяльності формувалася в умовах переважання паперової документації, фрагментарної автоматизації та функціональної ізоляваності конструкторських підрозділів. Розвиток цифрових технологій, PLM-концепцій, Digital Twin, MBSE, AI-assisted engineering та кіберфізичних систем зумовив формування принципово нової моделі - інтелектуальної конструкторської діяльності. Інтелектуальна конструкторська діяльність перетворюється у інтегровану цифрову систему створення, накопичення, використання та управління інженерними знаннями протягом життєвого циклу виробу. Обґрунтовано, що конструкторська діяльність виступає базовим елементом системи управління якістю, оскільки визначає параметри майбутніх виробничих процесів і кінцевого продукту. Запропоновано впровадити інтеграцію маркет-форсайту у керовану системну функцію якості, що дозволить перейти від реактивного до проактивного управління інженерними рішеннями, забезпечуючи не лише їх технічну досконалість, але й відповідність майбутнім вимогам ринку. Сформульовано рекомендації конструкторським бюро машинобудівних підприємств щодо застосування механізмів інтелектуалізації конструкторської діяльності.

Ключові слова: інтелектуалізація, цифрова трансформація, якість, машинобудування, конструкторська діяльність.

Mekhovich Sergiy, D.E.Sc., professor of the Department of Business Economics and International Economic Relations, +38(050)402-62-12, sm261245@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7080-7609

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

Trush Yevgen, PhD student of the Department of Business Economics and International Economic Relations, +38(098)380-17-33, evgentrush80@gmail.com

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

Potapov Fedir, Design Engineer, Postgraduate Student Department of Business Economics and International Economic Relations, +38(068)307-38-43, potapovf333@gmail.com

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

APPROACHES TO ENSURING EFFECTIVE DESIGN OF INNOVATIVE TECHNOLOGY ON THE BASIS OF QUALITY MANAGEMENT OF DESIGN ACTIVITIES IN THE CONDITIONS OF INTELLECTUALIZATION OF ENGINEERING PROCESSES

Abstract. *The article proposes the concept of an economic mechanism for managing the quality of design activities in the conditions of intellectualization of engineering processes. The increasing complexity of technical systems, the need to reduce the product development cycle, increasing requirements for innovation and the speed of technological renewal determine the need to form a new economic paradigm of engineering activities. Under these conditions, design activities cease to be a local process of creating design documentation and are transformed into a complex multi-level system for managing digital engineering knowledge throughout the entire product life cycle. It is noted that the traditional model of design activity was formed in conditions of dominance of paper documentation, fragmented automation and functional isolation of design departments. The development of digital technologies, PLM concepts, Digital Twin, MBSE, AI-assisted engineering and cyber-physical systems led to the formation of a fundamentally new model - intelligent design activity. Intelligent design activity is transformed into an integrated digital system of creation, accumulation, use and management of engineering knowledge throughout the product life cycle. It is substantiated that design activity acts as a basic element of the quality management system, since it determines the parameters of future production processes and the final product. It is proposed to implement the integration of market foresight into a managed system function of quality, which will allow to move from reactive to proactive management of engineering solutions, ensuring not only their technical perfection, but also compliance with future market requirements. Recommendations are formulated for design bureaus of machine-building enterprises on the application of mechanisms for intellectualization of design activity.*

Keywords: *intellectualization, digital transformation, quality, mechanical engineering, design activities.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку цифрової економіки та інтелектуалізації виробничих систем вимоги до створення інноваційних технологій зазнають значних змін. Глобальна конкуренція, скорочення життєвих

циклів продукції, складність технічних систем, зростання ролі цифрових технологій та необхідність швидкої адаптації до змін у ринковому середовищі визначають необхідність підвищення ефективності проектної діяльності. Традиційні підходи до організації проектних процесів, орієнтовані, перш за все, на локальне проектування продукції та контроль технічних параметрів, все більше втрачають свою ефективність в умовах цифрової трансформації промисловості. Особливої актуальності набуває питання забезпечення якості проектної діяльності як комплексної характеристики ефективності інженерних рішень, рівня цифровізації, інноваційності, адаптивності та інтеграції проектних процесів.

Інтелектуалізація інженерних процесів на основі використання технологій штучного інтелекту, цифрових двійників, генеративного проектування, систем аналізу великих даних, хмарних платформ та автоматизованих систем підтримки рішень створює нові можливості для підвищення якості проектної діяльності. Водночас існує потреба в розробці нових підходів до управління якістю проектної діяльності як системного фактора, що забезпечує ефективне проектування інноваційних технологій. Отже, поточним дослідницьким завданням є розробка підходів до забезпечення ефективного проектування інноваційних пристроїв на основі інтегрованого управління якістю проектної діяльності в умовах інтелектуалізації інженерних процесів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання інтелектуалізації конструкторської діяльності стали популярні у науковому середовищі. Вчені Каліфорнійського технологічного інституту Д-р Манас Баджаджі та д-р Дірк Цвемер (США) у своїй роботі підняли дуже важливу тему – інтеграція моделей механічного проектування зі специфікаціями системи (SysML) як відправної точки для механічного проектування. Автори не обійшли також організаційні, культурні та технічні проблеми, які необхідно вирішити для безперешкодної інтеграції між моделями архітектури системи та моделями механічного/електричного проектування. Вчені підкреслили, що досягнення в інструментах автоматизованого проектування (CAD) та середовищах управління життєвим циклом продукту (PLM) дозволяють розробляти складні продукти за

коротші терміни. Слід погодитись з вченими, що більша частина детальної інженерії виконується за допомогою різноманітних інструментів моделювання та симуляції, а системна інженерія переходить від практики, заснованої на документах, до практики, заснованої на моделях [1]. В іншій статті досліджено можливості SysML V2 для подолання розриву між системним моделюванням та проєктуванням мереж [2]. У статті «Підхід системної інженерії на основі моделей (MBSE) для підтримки життєвого циклу – Фаза III» автори виступили з ініціативою підвищення ефективності процесу інженерії підтримки життєвого циклу, що зрештою призведе до зниження витрат на розробку, зниження витрат на підтримку, скорочення графіків та покращення якості продукції [3]. Взаємодії моделей САПР та специфікацій SysML для автоматизованої перевірки вимог до проєктування присвячена стаття групи вчених на чолі з Ріхаб Брахмі [3]. Автори зазначили, що певна кількість дослідницьких робіт зосереджені на обміні даними між програмами автоматизованого проєктування (CAD) та автоматизованого проєктування (CAE) або на рівнях розробки та виробництва CAD, однак мало робіт вивчають взаємодію між усіма рівнями розробки продукту та рівнем системної інженерії. Вони звертають увагу на відсутність безперервності між моделлю системної інженерії, яка має глобальний погляд на продукт, та моделлю CAD, яка інтегрує дані CAD деталей та збірок, що призводить до величезної втрати часу в процесі перевірки та валідації вимог. Вчені пропонують методологію, що дозволяє забезпечити сумісність між специфікаціями системного рівня та CAD-моделлю продукту, що проєктується [3,4]. Робота Ріхаба Брахмі та інших дослідників є цінним науковим внеском у розвиток автоматизованого управління проєктами, але сучасна інженерія спирається на готові засоби автоматизації від світових виробників програмного забезпечення. Метью Андерсон Хендрікс і Аліса Чічірелло свою статтю присвятили пришвидшенню проєктування та впровадження інженерних динамічних систем, пропонуючи стратегію використання предметних та експертних знань для автоматичної генерації обчислювальної моделі динамічної системи, починаючи з корпусу документів, що стосуються динамічної системи, та вхідного документа, що

описує конкретну систему. Застосування авторами запропонованого підходу демонструється на комплексному прикладі, від тексту до простої моделі маятника, демонструючи покращену продуктивність порівняно з результатами, отриманими за допомогою моделей LLM лише в режимі без втрат [4]. У статті українських вчених Нагорняка Г. С. та Ханнуфа К. Є. викладено особливості викликів та можливостей формування інтелектуального капіталу підприємств машинобудівного комплексу України в умовах цифровізації [5]. Автори наголошують, що стрімкий розвиток цифрових технологій і сфер ІТ приводять до автоматизації виробничих процесів, що обумовлює тенденцію до зникнення частини професій, що суттєво змінить управління сукупним інтелектуальним капіталом у майбутньому. На підставі дослідження сформульовані висновки про потребу застосування механізмів ефективного управління інтелектуальним капіталом машинобудівних підприємств у майбутньому [5]. Стратегія, запропонована авторами, відображає майбутнє інженерії. Наразі це новаторська наукова робота, яка демонструє напрямок розвитку глобального проектування складних систем. Світові лідери галузі йдуть схожими шляхами, тоді як в Україні використання подібних інструментів штучного інтелекту в системній інженерії залишається темою ізольованих досліджень та експериментів у сфері передових технологій. Інший вчений Олександр Пінчук у своїй статті розглядає роль штучного інтелекту (ШІ) як ключового інструменту інноваційного розвитку машинобудівного сектору України. [6]. Дослідником проаналізовано сучасні виклики галузі, зокрема зношеність основних фондів, падіння експорту, дефіцит інвестицій та кадровий відтік. Визначено перспективні напрями використання ШІ, в числі яких автор вважає предиктивне обслуговування обладнання, оптимізація виробничих процесів, автоматизація контролю якості, розробка нових продуктів, цифровізація експорту та кіберзахист. Запропоновано модель оцінки економічного ефекту впровадження ШІ, апробовану на прикладі підприємств Пожмашина, Тітал, MAN Україна, АвтоКРаз, Validus. Результати розрахунків показали, що впровадження ШІ забезпечує зростання прибутковості та зменшення витрат, а рівень ROI досягає понад 45 %. Прогнозні розрахунки підтверджують потенційне

зростання продуктивності підприємств більш ніж на 50 % протягом трьох років. Зроблено висновок, що ІІ є критичним фактором підвищення конкурентоспроможності машинобудування, інтеграції у світові ринки та розвитку експортного потенціалу України [6]. Є інші публікації, в яких піднімаються питання зв'язання інженерних задач, використання штучного інтелекту в бізнес-процесах підприємства, проблеми розширеної системної інженерії на основі моделей протягом життєвого циклу системи та інші [9–16]. У той же час, питання створення економічного механізму управління якістю конструкторської діяльності а не щодо застосування штучного інтелекту та машинного навчання для не також питання щодо інтелектуалізації конструкторської діяльності практично не піднімаються.

Метою статті є розгляд та обґрунтування підходів до забезпечення ефективного проектування інноваційних пристроїв на основі управління якістю проектною діяльністю в умовах інтелектуалізації інженерних процесів, а також визначення напрямків інтеграції цифрових та інтелектуальних технологій у систему проектною освіти підприємств.

Викладення основного матеріалу. Традиційна модель конструкторської діяльності формувалася в умовах переважання паперової документації, фрагментарної автоматизації та функціональної ізольованості конструкторських підрозділів. Основною метою діяльності конструктора виступало створення комплексу креслень і технічної документації, необхідної для передачі виробу у виробництво. При цьому сам процес проектування характеризувався значною трудомісткістю, великою кількістю ручних операцій, повторним виконанням однотипних інженерних дій, високим рівнем залежності від індивідуального досвіду конструктора та низьким рівнем інтеграції між КБ, виробництвом і системами управління підприємством.

Розвиток цифрових технологій, PLM-концепцій, Digital Twin, MBSE, AI-assisted engineering та кіберфізичних систем зумовив формування принципово нової моделі організації конструкторської діяльності – інтелектуальною конструкторської діяльності. Інтелектуальна конструкторська діяльність

перетворюється у інтегровану цифрову систему створення, накопичення, використання та управління інженерними знаннями, що функціонує на основі цифрових платформ, PLM-технологій, цифрових двійників, штучного інтелекту та безперервного цифрового потоку даних протягом життєвого циклу виробу.

На відміну від традиційної конструкторської діяльності, інтелектуальна модель орієнтована не лише на створення технічної документації, а на управління цифровими інженерними знаннями та інтеграцію конструкторських бюро (КБ) із виробництвом на основі цифрової безперервності даних, генеративного проєктування та AI-підтримки прийняття інженерних рішень.

Однією з ключових особливостей інтелектуальної конструкторської діяльності виступає перехід від ізольованого проєктування до інтегрованого цифрового життєвого циклу виробу, у межах якого конструкторський підрозділ стає центральним елементом цифрового середовища підприємства. У сучасних умовах конструктор вже не виконує виключно функцію розробника креслень, а виступає архітектором цифрової моделі виробу, інтегрованої з виробничими системами, технологічною підготовкою, логістикою, економічними підсистемами, сервісним обслуговуванням та системами експлуатації виробу. Технологічною основою інтелектуальної конструкторської діяльності виступає інтеграція CAD/CAE/CAM/PLM/MES/ERP-систем у єдине цифрове середовище управління життєвим циклом виробу, де кожна система виконує певні функції.

CAD-системи – це спеціалізоване програмне забезпечення для автоматизації роботи інженера-конструктора, які забезпечують створення параметричних цифрових моделей виробу. В професійній термінології вони відомі як САПР (системи автоматизованого проєктування). *CAE-системи* це програмні комплекси для інженерного аналізу та симуляції фізичних процесів. Вони дозволяють здійснювати інженерний аналіз, моделювання навантажень, міцності, теплових режимів, аеродинаміки та інших характеристик виробу. *CAM-системи* забезпечують інтеграцію проєктування із технологічною підготовкою виробництва та системами ЧПУ. *PLM-системи* реалізують управління життєвим циклом виробу, цифровими потоками даних, конфігураціями та змінами. *MES-*

системи забезпечують оперативне управління виробничими процесами, а ERP- це програмне забезпечення для планування ресурсів підприємства, яке об'єднує всі ключові бізнес-процеси компанії в єдину цифрову екосистему. Замість того, щоб кожен відділ використовував окремі таблиці чи програми, ERP створює спільну базу даних для всієї організації – інтеграцію інженерної діяльності з економічними та ресурсними підсистемами підприємства.

Інтеграція зазначених систем формує єдиний цифровий контур управління життєвим циклом виробу: КБ-PLM-Digital Twin-MES-ERP-виробництво-експлуатація-зворотний зв'язок-КБ. Тобто, однією з найважливіших особливостей інтелектуальної конструкторської діяльності виступає повторне використання в інженерії інженерних рішень (engineering reuse). У межах такої моделі забезпечується цифрова безперервність даних, за якої всі зміни конструкції автоматично синхронізуються між підсистемами підприємства. Це практика застосування вже існуючих знань, компонентів, специфікацій або готових рішень для створення нових продуктів замість їх розробки з нуля. Головна мета цього підходу – скоротити витрати, прискорити вихід продукту на ринок та мінімізувати ризики завдяки використанню вже перевірених і протестованих елементів [10]. Об'єкти повторного використання залежать від інженерної галузі. У розробці програмного забезпечення (Software Engineering) це готові бібліотеки, фреймворки, мікросервіси, шаблони проектування (design patterns) або фрагменти коду. В системній інженерії (Systems Engineering) – технічні вимоги, архітектурні моделі, плани тестування та документація. В електроніці (Hardware/PCB Design) – перевірені блоки схем, готові шари друкованих плат або блоки інтелектуальної власності (IP cores). У промисловому виробництві – стандартизовані деталі, модульні платформи (наприклад, автомобільні платформи, на яких будують різні моделі авто). У цифровому середовищі PLM інженерні рішення перетворюються на цифрові активи підприємства та можуть багаторазово використовуватися у нових проєктах. Повторне використання охоплює цифрові моделі, параметричні шаблони, вузли та агрегати, результати CAE-аналізу, цифрові двійники, технологічні маршрути, бібліотеки компонентів, перевірені інженерні рішення.

Ключові переваги підходу полягають у економії часу: усуваються повторні зусилля на проектування та тестування базових елементів, підвищується якість, знижується вартість, стандартизація – полегшує підтримку та оновлення систем, оскільки різні продукти компанії мають схожу архітектуру.

У традиційному КБ значна частина конструкторських рішень створюється повторно, що зумовлює дублювання робіт, збільшення строків проектування та зростання ризику помилок. В умовах цифрової трансформації промисловості та переходу до концепцій Industry 4.0, Digital Engineering, PLM та цифрових двійників конструкторська діяльність перетворюється із локального процесу підготовки документації на інтегровану інтелектуальну систему управління життєвим циклом виробу. У таких умовах традиційні показники оцінювання ефективності роботи конструкторських підрозділів перестають повною мірою відображати реальний внесок конструкторської діяльності у забезпечення конкурентоспроможності підприємства. Саме тому виникає необхідність формування інтегральної системи КРІ інтелектуальної конструкторської діяльності, яка дозволяє комплексно оцінювати економічну ефективність, швидкість інженерної розробки, рівень цифровізації, якість конструкторських рішень, ступінь інтеграції КБ із виробництвом, інноваційність та адаптивність інженерних процесів. Інтегральна система КРІ інтелектуальної конструкторської діяльності являє собою багаторівневу систему взаємопов'язаних показників, що забезпечують кількісне оцінювання результативності функціонування конструкторських підрозділів у цифровому середовищі PLM/Industry 4.0. На відміну від традиційних підходів, така система орієнтована не лише на оцінювання трудомісткості або строків проектування, а й на цифрову узгодженість даних, ефективність цифрових потоків та швидкість внесення змін. Запропонована система орієнтована також на інтеграцію CAD/CAE/CAM/PLM/MES/ERP. Важливою функцією системи стає можливість оцінювання ефективності цифрових двійників, рівень автоматизації інженерних процесів та ефективність управління інженерними знаннями.

Цифрова трансформація промисловості суттєво змінює характер інженерної діяльності, зокрема процеси конструювання. Інтеграція цифрових платформ, використання моделювання, технологій штучного інтелекту та великих даних призводить до зростання складності інженерних систем і необхідності прийняття рішень в умовах невизначеності. Традиційні економіко-математичні моделі управління якістю, сформовані в умовах індустріальної економіки, не забезпечують належного рівня ефективності, оскільки орієнтовані на кінцевий результат, а не на процес, не враховують динаміку формування якості, не інтегрують цифрові дані у реальному часі.

Багаторічний досвід і сучасні дослідження свідчать, що якість продукції є результатом комплексної взаємодії організаційних, технологічних, економічних, інформаційних та соціальних факторів, що формуються протягом усього життєвого циклу виробу та тісно пов'язані із системою організації та управління конструкторською діяльністю. При цьому конструкторська діяльність виступає базовим елементом системи управління якістю, оскільки визначає параметри майбутніх виробничих процесів і кінцевого продукту. Слід зазначити, що існуючі підходи до управління якістю, зокрема концепції *TQM*, *Lean*, *Six Sigma*, здебільшого орієнтовані на виробничу стадію та недостатньо враховують специфіку сучасних умов організації конструкторських процесів. Це зумовлює необхідність формування спеціалізованого економічного механізму, спрямованого на підвищення якості конструкторської діяльності.

Якість конструкторської діяльності – це не просто точність креслення, а здатність конструктора генерувати оптимальні, інноваційні та життєздатні рішення в умовах глобалізації ринкового оточення, цифрового середовища і невизначеності. Сьогодні для вирішення цих питань існує проблема – розрив рівня знань та реальних задач. Конструктор навчається класичній інженерії, а працює в *AI-driven* середовищі, або середовищі, керованому штучним інтелектом. Це екосистема, де ключові процеси, рішення та взаємодії базуються на роботі алгоритмів штучного інтелекту. У такому середовищі технології не просто допомагають людині, а стають фундаментом для функціонування всієї системи.

Це також середовище цифрових двійників та мультифізичних симуляцій у якому конструктор реально має впроваджені CAD systems та PLM systems, на яких тримається сучасне проектування та виробництво будь-якого складного продукту від смартфона до ракети. CAD – це програмне забезпечення для створення цифрових 2D-креслень та 3D-моделей виробів. Воно дозволяє інженерам «малювати» деталь у віртуальному просторі, задавати її точні розміри, форму та матеріали. Його призначення – геометричне моделювання. Конструктор бачить, як деталь виглядає і чи підходять її частини одна до одної. PLM – це стратегія та програмне середовище для управління всім життєвим циклом продукту від ідеї та проектування до виробництва, сервісу та утилізації. У той же час, процеси залишились паперовими. До того ж, зношеність обладнання і основних фондів обмежує конструктивні рішення. Тобто, конструктор проектує “під слабке виробництво”, що обумовлює розрив інновації з виробничою базою. Не стикаються швидкість змін і повільні процедури, командна робота із індивідуальною відповідальністю, потреби у великих масивах даних з їх відсутністю та розрізненістю та інше.

Незважаючи на існуючі проблеми, в сучасних умовах цифрової трансформації конструкторська діяльність об’єктивно переходить від функціонально-декомпованої моделі до платформи-орієнтованої, в якій якість формується як керована системна функція, інтегрована в єдиний цифровий контур підприємства та реалізується через замкнутий цикл даних, алгоритмів і рішень. Стара економіко-математична теорія якості “ламається” не через неточність, а через іншу природу об’єкта управління. Це зміна наукової парадигми. Для вирішення цих задач авторами запропонована нова економіко-математична теорія управління інженерною якістю в умовах цифрової трансформації. На відміну від традиційних теорій, у яких якість розглядається як статична характеристика готового виробу, у новій економіко-математичній теорії якість розглядається як керована динамічна системна функція (KSFQ), інтегрована у цифровий контур підприємства. Вона вводиться у науковий обіг як керована системна функція якості конструкторської діяльності. Ця функція інтегрує дані, алгоритми, процеси

та людський фактор у єдиний механізм управління інженерними рішеннями. KSFQ – це механізм управління, який забезпечує формування, оцінювання та оптимізацію інженерних рішень у реальному часі через взаємодію даних, алгоритмів, процесів і людського фактору. Він формується в межах цифрових платформ через інтеграцію даних, алгоритмів і міждисциплінарних процесів та його місія полягає у забезпеченні безперервного формування, оцінювання та оптимізації інженерних рішень у реальному часі через взаємодію даних, алгоритмів і міждисциплінарних процесів. Для вимірювання ефективності функціонування KSFQ вводиться інтегральний індекс якості конструкторської діяльності (DAQI). Управління якістю трансформується від оптимізації параметрів до оптимізації траєкторії інженерних рішень. KSFQ забезпечує внутрішню оптимальність інженерних рішень, однак якість конструкції не має абсолютного значення поза ринковим контекстом. Тобто, оптимальне рішення – це конкурентоспроможне ринкового рішення. Для оптимізації стратегії просування інновації на ринку у KSFQ вводимо систему прогнозування і формування майбутніх ринкових вимог, яка забезпечує випереджальне узгодження інженерних рішень із динамікою попиту, технологій та конкурентного середовища – маркет-форсайт [8]. Інтеграція маркет-форсайту у керовану системну функцію якості дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління інженерними рішеннями, забезпечуючи не лише їх технічну досконалість, але й відповідність майбутнім вимогам ринку..

Ключовим елементом інтелектуальної конструкторської діяльності виступає цифровий двійник (Digital Twin), який являє собою динамічну цифрову модель виробу, здатну відображати його поведінку, технічний стан, навантаження та функціонування у реальному часі. На відміну від традиційної 3D-моделі, цифровий двійник забезпечує прогнозування поведінки виробу, віртуальні випробування, аналіз сценаріїв експлуатації, оцінювання наслідків конструкторських змін, аналіз надійності, прогнозування відмов. Цифровий двійник супроводжує процес проєктування на всіх стадіях життєвого циклу виробу та дозволяє виявляти помилки ще до етапу фізичного виробництва. Це

забезпечує скорочення кількості фізичних прототипів, зниження витрат на випробування та підвищення якості виробу.

Важливою характеристикою інтелектуальної конструкторської діяльності виступає рівень автоматизації інженерних процесів. Автоматизація охоплює генерацію документації, управління конфігураціями, автоматичну перевірку сумісності, управління змінами, генеративне проєктування та автоматизований аналіз даних. На відміну від традиційних підходів, автоматизація у сучасному КБ повинна бути спрямована не лише на підвищення продуктивності, а й на вивільнення інтелектуального потенціалу конструктора шляхом усунення рутинних операцій. У результаті конструктор концентрується не на виконанні допоміжних процедур, а на творчому пошуку нових технічних рішень.

Особливого значення в умовах цифрової економіки набуває управління інженерними знаннями (engineering knowledge management). У традиційних умовах значна частина критично важливих знань концентрувалася у досвіді окремих фахівців, що створювало ризики їх втрати у разі звільнення або зміни персоналу. У цифровому середовищі інженерні знання формалізуються і накопичуються у PLM-системах, інтегруються з AI-аналітикою та стають стратегічним цифровим активом підприємства. Система управління інженерними знаннями забезпечує накопичення досвіду, повторне використання рішень, аналіз попередніх проєктів, формування цифрових бібліотек, AI-підтримку проєктування, зменшення залежності від окремих спеціалістів та прискорення підготовки нових кадрів. Таким чином, у сучасних умовах головним результатом функціонування конструкторського підрозділу стають уже не окремі креслення або комплекти документації, а цифрові інженерні знання, інтегровані у єдиний цифровий життєвий цикл виробу. Це зумовлює необхідність переходу до нових підходів оцінювання ефективності конструкторської діяльності, заснованих на інтегральній системі KPI інтелектуальної конструкторської діяльності, що враховує економічну результативність, цифрову зрілість, ефективність цифрових двійників, інтеграцію PLM, рівень AI-assisted engineering.

Теорія інтелектуальної конструкторської діяльності формує новий підхід до розуміння ролі конструкторської діяльності у цифровій економіці. На відміну від традиційних моделей, у межах яких конструкторська діяльність розглядалася переважно як локальна функція технічної підготовки виробництва, сучасна інтелектуальна модель перетворює її на центральний елемент цифрової екосистеми підприємства та Industry 4.0.

Запропонована теорія має багаторівневий характер і здійснює системний вплив на рівень окремого конструктора, на рівень конструкторського бюро, на рівень підприємства, на рівень цифрової промислової екосистеми Industry 4.0. У традиційній моделі організації праці конструктор виконував переважно функції створення креслень, оформлення документації, виконання розрахунків, внесення змін, супроводу виробництва. Його діяльність значною мірою була орієнтована на виконання локальних технічних операцій, а рівень інтеграції з іншими підсистемами підприємства залишався обмеженим.

Теорія інтелектуальної конструкторської діяльності змінює саму сутність професійної ролі конструктора. У цифровому середовищі Industry 4.0 конструктор перетворюється не на виконавця креслярських операцій, а на інтегратора цифрових інженерних знань та архітектора цифрової моделі виробу. Теорія інтелектуальної конструкторської діяльності змінює організацію праці конструктора практично у всіх напрямках. Таким чином, здійснюється перехід від ручного проектування до цифрового управління моделями продукту. Конструктор працює з параметричними моделями, цифровими двійниками, інженерією за допомогою штучного інтелекту, проектуванням на основі моделювання та моделями MBSE. Розглянемо сутність цих інструментів.

Параметричні моделі в машинобудуванні – це цифровий підхід до 3D-моделювання та проектування, в якому форма, розміри та відносне розташування деталей визначаються не фіксованими лініями, а математичними параметрами, формулами та логічними зв'язками між ними [2.3]. У той час як у звичайному 3D-моделюванні зміна одного виміру вимагає ручного перемальовування всієї деталі, у параметричній моделі змінюється одне число (параметр), і вся конструкція

автоматично перебудовується, зберігаючи логіку проектування [2, 3]. Пояснимо це на прикладі параметризації компонентів корпусу (картери, шестерні). Залежність товщини від навантаження: товщину стінки корпусу можна вказати не числом (наприклад, 10 мм), а за формулою: (Товщина_стінки = Вхідний_крутний_момент x Коефіцієнт_відстані / 50). Здійснюється автоматичне масштабування. Якщо замовник запитує збільшення розмірів редуктора на 20 %, параметрична модель автоматично розтягує стінки корпусу, пропорційно збільшує радіус заокруглення (заокруглення) та автоматично переміщує отвори для болтів кріплення кришки, зберігаючи задану відстань від краю. Таке ж саме для рухомих механізмів та шестерен (вали, шестерні). Шестерня описується за допомогою основних параметрів: модуля пружності шестерні (m) та кількості зубців (z) [2, 3]. Програма автоматично будує евольвенту зубця, розраховує діаметр діляльного зубця за формулою ($d = m \cdot z$) та генерує 3D-модель [4]. Зв'язок вал-підшипник. Ви можете пов'язати діаметр вала в місці посадки підшипника з внутрішнім діаметром підшипника в збірці. Якщо конструктор змінює діаметр вала через збільшення навантажень, посадка підшипника в корпусі та сам підшипник у збірці вибираються та автоматично змінюють розмір. Можна виділити три рівня параметризації бази знань: геометричний, топологічний та глобальний. Геометричний працює в межах однієї деталі: зв'язок між ескізами. Наприклад: «довжина канавки завжди вдвічі більша за її ширину». Топологічний – в межах збірки: зв'язок між різними деталями. Наприклад: «центральна лінія отвору в кришці завжди збігається з центральною лінією отвору в корпусі».

Глобальний рівень-таблиця/код: керування продуктом за допомогою зовнішніх таблиць (Excel) або вбудованих скриптів (iLogic в Inventor, інструменти в SolidWorks/NX). Змінивши один рядок у таблиці, конструктор отримує новий розмір для всієї коробки передач або трансмісії за лічені секунди.

Параметричні моделі працюють разом із SysML та штучним інтелектом (ШІ).

Вони займають відсутню ланку в автоматичному зв'язку між САПР та архітектурою системи (SysML). Міст до SysML полягає таким чином, що системні

вимоги визначаються на параметричній діаграмі в SysML (наприклад, $Max_Weight = 15$ кг). Параметрична САПР-модель корпусу передає його фактичну вагу (CAD_Mass) до SysML. Якщо $CAD_Mass > Max_Weight$, система негайно спрацьовує тривогу.

Сучасні інструменти ШІ аналізують параметричні моделі та допомагають знаходити помилки в логіці проєктування. Наприклад, ШІ може попереджати: «Якщо зменшити параметр діаметра вала до значення менше 30 мм, параметричне з'єднання з кришкою підшипника буде порушено (відбудеться геометричне зіткнення)». ШІ також оптимізує параметри під час генеративного проєктування або тестування на основі моделювання.

Ключові переваги для аерокосмічної та оборонної промисловості полягають у створенні лінійки продуктів (конфігуратори). Замість проєктування 10 різних трансмісій, конструктор створює єдину гнучку параметричну модель. Для нового клієнта просто вводяться нові вхідні параметри і система згенерує готову 3D-модель та креслення. Якщо корпус потребує посилення під час випробувань, конструктор змінює лише один параметр товщини жорсткості і вся конструкція, що складається з сотен деталей, перебудовується правильно, без «зльоту» поверхонь або помилок.

Цифровий двійник у машинобудуванні – це не просто 3D-модель, а динамічна віртуальна копія реального фізичного продукту (компонента, трансмісії або цілого автомобіля/літака), яка постійно синхронізується з ним за допомогою даних і може моделювати його поведінку в режимі реального часу [4]. Якщо стандартна САД-модель є «статичним кресленням», то цифровий двійник – це «жива модель». Він знає, як деталь була спроектована, як вона була виготовлена на заводі та як вона зараз працює на випробувальному стенді або в обслуговуванні клієнтів. Для конкретних застосувань (деталі корпусу + рухомі механізми) цифрові двійники використовуються у три етапи

Етап 1. Проєктування (проектний цифровий двійник). Це суперпараметрична модель, яка поєднує результати моделювання САД та САЕ з вимогами SysML. Для редукторів вона дозволяє віртуально «перемотувати»

редуктор в екстремальних умовах експлуатації ще до того, як він буде відлитий з металу, виявляючи резонанси корпусу або нестачу оливи в підшипниках.

Етап 2. Виробництво (виробничий цифровий двійник). Він враховує фактичні виробничі дефекти. Якщо стінка корпусу редуктора на 0,5 мм тонша, ніж у заводському відливі, або вал оброблений з мінімальним допуском, ці дані подаються в двійник. Проектувальник бачить не «ідеальну модель», а копію конкретної залізничної моделі.

Етап 3. Виробничі операції (операційний, або продуктивний цифровий двійник). Реальна коробка передач у літаку або військовому транспортному засобі оснащена датчиками (вібрації, температури, тиску оливи). Ці дані передаються назад проектувальникам у проектному бюро через Інтернет (IoT). Фізична частина працює в польових умовах, а її цифровий двійник «обертається» на комп'ютері розробника, повністю відтворюючи її стан.

Завдяки штучному інтелекту та машинному навчанню цифровий двійник перетворюється з пасивного екрану моніторинга на інтелектуального помічника конструктора, виконуючи аналіз та управління процесом створення нової конструкції.

Прогнозний аналіз та надійність (прогнозна інженерія). Штучний інтелект аналізує дані з робочого двійника редуктора та прогнозує знос. Проектувальник отримує повідомлення: «За поточних вібраційних навантажень підшипник номер 3 вийде з ладу після 40 годин роботи». Це дозволяє в майбутньому вдосконалювати проєкт на основі реальних, а не теоретичних даних.

Наскрізний інтелектуальний зв'язок. Моделювання САПР SysML Наприклад, треба вирішити проблеми розірваного з'єднання. Архітектура SysML встановлює правила гри (граничні обмеження), параметрична модель САПР створює корпус двійника, агенти ІІІ всередині двійника автоматично запускають тести на основі моделювання щоразу, коли проектувальник змінює геометрію. Якщо датчик виявляє перегрів у реальному сценарії, інтелектуальний цифровий двійник автоматично оновлює теплову модель у системі САПР, перебудовує

параметричні діаграми в SysML та рекомендує конструктору зміни до геометрії ребер охолодження.

Інженерія із замкнутим циклом. Раніше, після подання креслень на завод, конструктор практично не пізнавав як його продукт працює в польових умовах, хіба що він виходив з ладу за гарантією. Інтелектуальний двійник надсилає набори даних назад до конструкторського бюро. Конструкторська діяльність стає керованою даними – рішення приймаються на основі мільйонів годин віртуальної та реальної експлуатації. Що це означає для аерокосмічної та оборонної промисловості. Сертифікація цифрових прототипів: військові замовники дозволяють замінити певні дорогі та небезпечні польові випробування (наприклад, стрільбу по фюзеляжу або роботу коробки передач під критичним перевантаженням) на випробування інтелектуального цифрового двійника після підтвердження точності. Підписуються Контракти із замовником на весь життєвий цикл згідно з якими конструкторське бюро продає не тільки коробку передач, але й її продуктивність. Завдяки двійнику замовник точно знає, коли агрегат потребує обслуговування, що є критично важливим, наприклад, для авіації.

ІІІ працює як допоміжна інженерія в проектуванні – це використання ІІІ для автоматизації проектування, розрахунків та моделювання фізичних об'єктів у системах CAD, CAE та PLM. Тут ІІІ виступає не лише як цифровий кресляр, а й як віртуальний інженер-експерт, який допомагає у створенні деталей, пристроїв, будівель або мікросхем завдяки генеративному проектуванню, прискореному моделюванню та зворотному проектуванню.

Генеративне проектування. Проектувальник встановлює лише обмеження (вага, матеріал, навантаження, бюджет), а ІІІ генерує сотні варіантів оптимальної геометрії. Отримані форми часто нагадують органічні структури та ідеально підходять для 3D-друку.

Прискорене моделювання (ІІІ-допоміжна CAE). Традиційні розрахунки міцності, аеродинаміки або теплопровідності (метод скінченних елементів) займають години. Моделі ІІІ (заміна фізики ІІІ) можуть миттєво передбачати

результати випробувань з точністю 95–98 %. Здійснюється оптимізація топології. Алгоритми штучного інтелекту аналізують готову 3D-модель та видаляють зайвий матеріал у ділянках, де немає критичних навантажень, зберігаючи міцність виробу та зменшуючи його вагу. Автоматизація креслення забезпечує перетворення 3D-моделей у 2D-креслення відповідно до стандартів (ISO/GOST), автоматичне додавання розмірів, допусків та створення специфікацій (BOM).

Зворотне проєктування: штучний інтелект допомагає швидко перетворити хмари точок з 3D-сканування реального об'єкта на дійсну, редаговану параметричну CAD-модель. У табл. 1 наведено порівняння традиційного та штучного інтелекту проєктування.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика традиційного та штучного інтелекту проєктування

| Етап робочого процесу | Традиційне проєктування | Проєктування за допомогою штучного інтелекту |
|-----------------------|--|--|
| Пошук ідеї та форми | Інженер вручну малює 2–3 варіанти проєкту | Штучний інтелект генерує понад 100 варіантів для заданих сил за лічені хвилини |
| Розрахунки міцності | Тривале налаштування сітки та багато годин розрахунків | Миттєвий аналіз за допомогою сурогатних моделей ІІІ |
| Вибір матеріалу | Пошук у каталозі на основі власного досвіду | Інтелектуальний вибір на основі бази даних з урахуванням логістики та ціни. |
| Виправлення помилок | Помилки виявляються під час тестування прототипу | Штучний інтелект прогнозує знос та дефекти ще на етапі створення ескізу |

Джерело інформації: Систематизовано авторами на основі 6, 8, 10, 12.

В числі популярних інструментів моделювання на ринку можна назвати наступні.

Autodesk Fusion (розширення генеративного проєктування) дозволяє розраховувати та генерувати оптимальні форми деталей для виробництва.

Ansys SimAI / Ansys Discovery-інструменти моделювання фізичних процесів, що використовують штучний інтелект для миттєвого відображення результатів повітряного потоку або деформації.

SolidWorks (модулі Eco-Design та штучного інтелекту). Підтримує прогнозне моделювання та автоматизацію рутинних складальних операцій.

Monolith AI: спеціалізована платформа для інженерів, яка використовує машинне навчання для прогнозування поведінки складних систем (автомобільної, аерокосмічної) без необхідності реальних випробувань.

У машинобудуванні інженерія за допомогою штучного інтелекту революціонує весь цикл від ескізу компонента до роботи верстата з ЧПК. У цьому випадку ШІ допомагає інженерам вирішувати найскладніші проблеми у фізиці, матеріалознавстві та технології виробництва. Розглянемо ключові застосування ШІ в конструкторській діяльності у машинобудуванні.

Генеративне проектування деталей (зменшення ваги). Наприклад, ШІ проектує компоненти підвіски, кронштейни або корпуси двигунів. Інженер визначає точки кріплення та сили, а ШІ видаляє зайвий метал. Результатом є деталі складної форми, які на 20–40 % легші за традиційні компоненти, витримуючи при цьому ті ж навантаження.

Швидке прототипування та гідродинаміка (CFD/FEA). Замість того, щоб годинами чекати на результати продувки турбіни або радіатора в CAE-системах, нейронні мережі (наприклад, Ansys SimAI) надають прогнози потоку повітря або тепла за лічені секунди. Це дозволяє щодня тестувати тисячі геометричних варіантів.

Проектування для виробництва (DFM). Помічник ШІ аналізує 3D-модель складання та негайно попереджає конструктора: «Цю внутрішню порожнину неможливо фрезерувати на 3-осьовому верстаті» або «Товщина стінки під час лиття викликає внутрішній дефект».

Автоматизація складання. Роботизовані плагіни автоматично вибирають кріплення (болти, гайки, шайби), розраховують крутні моменти з'єднань та перевіряють складання на наявність зазорів та перетинів (виявлення зіткнень).

Економічний ефект для конструкторських бюро та заводів полягає у скороченні часу проектування: розробка складної шестерні або маніпулятора прискорюється в 2–3 рази; зменшенні витрат матеріалів: зменшення ваги деталі – зниження витрат на метал (особливо критично для титану, алюмінію та

спеціальних сплавів); економічна тестуванні: кількість повномасштабних випробувань та дефектних прототипів мінімізована.

Для конкретних застосувань (деталі корпусу та рухомі механізми/шестерні) інженерія за допомогою штучного інтелекту забезпечує максимальний економічний ефект. У цих застосуваннях жорсткість, баланс, тепловіддача та втомна міцність є вирішальними. Нижче наведено добірку конкретних сценаріїв та інструментів ШІ, розділених на області.

1. Проектування деталей корпусу (картери, редуктори, блоки, кронштейни)

Головна мета – зменшити вагу, забезпечити жорсткість та розглянути методи лиття або фрезерування.

2. Генеративне проектування та оптимізація топології. Замість проектування на око, ви вказуєте ШІ, де монтувати підшипники, вали та де корпус буде кріпитися до рами. ШІ сам створює внутрішні ребра жорсткості з оптимальними формами.

3. Контроль лиття та оснащення (DFM). ШІ перевіряє геометрію корпусу на ранній стадії та вказує, чи форма деталі завадить її вийняттю з форми, чи вимагатиме надмірно складних стрижнів.

4. Управління температурою та вібрацією. Корпуси редукторів часто функціонують як радіатори. Помічники ШІ оптимізують форму ребер охолодження, щоб забезпечити максимальне тепловідведення та послабити резонансні коливання від шестерень. При цьому застосовуються такі інструменти: Autodesk Generative Design (Fusion/Inventor), Altair Inspire, Ansys Discovery (для миттєвого аналізу вібрації корпусу).

5. Рухомі механізми та шестерні (вали, шестерні, важелі, зв'язки). У цьому випадку штучний інтелект допомагає керувати динамічними навантаженнями, тертям та втомою металу.

6. Багаточастинкова динаміка. Штучний інтелект миттєво розраховує кінематику механізму. За лічені секунди ви можете змоделювати поведінку важливої системи або планетарної передачі при 5000 об/хв, визначаючи критичні прискорення та пікові сили.

7. Оптимізація передач. Нейронні мережі допомагають вибрати модифікації профілю зуба шестерні (поздовжнього та вертикального) для зменшення шуму (NVH) та збільшення площі контакту під навантаженням.

8. Вибір та розрахунок вузлів підшипників: Помічники штучного інтелекту в поєднанні з інженерними базами даних прогнозують втомну довговічність валів та підшипників, враховуючи мікродеформацію.

Проектування на основі моделювання. Це підхід у машинобудуванні, де віртуальне тестування за допомогою автоматизованого проектування (CAE/моделювання) проводиться не в кінці процесу проектування для перевірки готового компонента, а з першого дня розробки концепції для визначення його форми. Традиційно конструктор спочатку створює корпус або вал у системі CAD, а потім передає його до конструкторського відділу (розрахунок на міцність, гідравліку, теплове проектування). Якщо виявлено помилку або дефект, компонент повертається на доопрацювання. Це займає багато часу та коштує дорого.

У проектуванні на основі моделювання, яке інтегрується безпосередньо в робочий простір конструктора, інженер малює ескіз і одразу бачить, де виникають критичні навантаження, як розподіляється тепло всередині корпусу редуктора або як поводить ся рухомий механізм. Для конструктора цей підхід радикально змінює весь робочий процес. Розглянемо на прикладах.

1. *Проектування деталей корпусу.* Традиційно конструктор малює стінки корпусу з «надлишком» міцності, що робить їх занадто важкими. Через тиждень оцінювач виявляє, що напруження критичні в одному кутку, тоді як в іншому метал «розслабляється». На основі моделювання конструктор проводить експрес-аналіз міцності безпосередньо під час моделювання. Програмне забезпечення виділяє зони концентрації напружень. Інженер додає жорсткість саме там, де потрібно, і одразу бачить результати. Корпус виявляється легким і міцним з першої спроби.

2. *Механізми та передачі руху.* Традиційно збирається повна 3D-модель редуктора або маніпулятора, і лише потім перевіряється кінематика та динаміка.

Помилка в довжині одного важеля змушує переробляти всю конструкцію. На основі моделювання інженер починає з простої двовимірної або тривимірної лінійної діаграми механізму. Програмне забезпечення моделює траєкторії, швидкості, сили інерції та крутні моменти. Тільки коли кінематична діаграма ідеально збалансована, конструктор додає фактичну геометрію деталі.

Завдяки ІІІ концепція проєктування на основі моделювання зараз дуже популярна. Раніше конструктори неохоче проводили моделювання самостійно, оскільки класичний метод скінчених елементів (МСЕ) вимагав складного налаштування сітки та розрахунків, які займали години. Сучасний ІІІ (наприклад, технології в Ansys Discovery або Siemens NX) використовує сурогатні моделі на основі нейронних мереж. Вони забезпечують негайний (в режимі реального часу) зворотний зв'язок, коли інженер рухає мишею. Він змінює товщину стінки корпусу і карта кольорових напружень розраховується за частки секунди, а не за години. Ключові переваги цього підходу в машинобудуванні полягають у наступному.

1. *Скорочення часу розробки (часу виходу на ринок)*. Кількість ітерацій між конструктором та обчислювальним відділом скорочується на 50–70 %.

2. *Нижча вартість фізичних прототипів*. Оскільки деталь пройшла сотні віртуальних симуляцій міцності, вібрації та температури під час проєктування, перший прототип рейки або металу зазвичай працює правильно.

3. *Інновації*. Дизайнери не бояться експериментувати зі сміливими формами корпусів або новими кінематичними схемами передач, оскільки тестування нової ідеї займає лише кілька хвилин.

Таким чином, проєктування на основі моделювання та інженерії за допомогою штучного інтелекту допоможе дизайнерам працювати швидше, точніше та позбавить їх страху зробити критичну помилку в розрахунках. Основна проблема, з якою стикаються дизайнери під час самостійної оцінки міцності та кінематики, полягає в тому, що традиційне програмне забезпечення САЕ є занадто складним, вимагає складної математики для конфігурації сітки та

займає багато часу. Штучний інтелект та сучасні модулі CAD вирішують цю проблему, автоматизуючи «рутинні» розрахунки.

Слід зазначити, що конструкторам не потрібні «важкі» пакети для професійних фахівців з обчислень (таких як Ansys Fluent або Abaqus). Для конструкторів створено клас програмного забезпечення з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та прискоренням штучного інтелекту. ШІ допомагає конструкторам уникнути помилок у розрахунках. Оскільки конструктори не є професійними калькуляторами, ШІ діє як «страховка».

1. Автоматичне виявлення контактів (розумні контакти). Корпуси та шестерні містять багато деталей (гвинти, вали, кришки, підшипники). Раніше було необхідно вручну визначати, як вони взаємодіють (де є зварювання, де є прослизання, де є напруга). ШІ сам аналізує зазори у вузлі та розміщує правильні фізичні контакти за лічені секунди.

2. Керування концентратором напружень (*AI Insights*). ШІ аналізує результати та надає текстові або візуальні підказки: «Цей внутрішній кут корпусу має критичне напруження. Рекомендується збільшити радіус закруглення до 3 мм».

3. Виявлення сингулярності. Традиційні розрахунки часто призводять до «хибних математичних нескінченностей» (коли програма показує велике напруження в точці прикладання сили, якого насправді немає). Штучний інтелект може розпізнати такі помилки програмного забезпечення та повідомити інженера: «Це математична помилка в сітці; фактична міцність елемента нормальна».

Модельно орієнтована системна інженерія (MBSE) – це методологія проектування складних систем, яка замість сотень сторінок текстової документації (ТС, специфікації, звіти) використовує єдину цифрову взаємопов'язану модель системи. Простіше кажучи, традиційний документоорієнтований підхід передбачає зберігання вимог до редуктора в Word, кінематики в Excel, 3D-моделі корпусу в CAD та результатів випробувань у PDF. Цей хаос схильний до помилок, для запобігання яких моделі MBSE об'єднують усе це в єдиний «цифровий організм». Якщо змінити потужність двигуна в

основній моделі, система автоматично розрахує крутний момент валів у коробці передач та оновить вимоги до міцності корпусу.

В машинобудуванні у проєктуванні модель MBSE описує продукт з чотирьох основних точок зору: так звана матриця Rhapsody / MagicDraw / SysML-вимоги, поведінка, структура, параметри.

Вимоги. Що повинна робити машина або вузол? (Наприклад, «Корпус коробки передач повинен витримувати крутний момент 500 Нм і важити менше 15 кг»).

Поведінка. Як система функціонує в динаміці? Описуються стани коробки передач: нейтральний, перемикання передач, екстрене гальмування та перегрів.

Структура. З яких фізичних частин складається механізм? (вали, шестерні, підшипники, картер, датчики температури).

Параметри. Математичні формули та фізичні закони, що пов'язують структуру та поведінку (наприклад, розрахунок передавальних чисел або розсіювання тепла).

Під час проєктування, наприклад, деталей кузова та рухомих механізмів/коробок передач MBSE виступає в ролі «архітектурного мосту» перед тим, як конструктор почне створювати 3D-модель. Цей мост спирається на такі опори, як мехатроніка, відстежуваність та співпраця без суперечок.

Мехатроніка. Наприклад, сучасна коробка передач – це не лише метал, а й датчики, гідравлічні клапани та блок керування двигуном (ECU). Модель MBSE дозволяє проєктувати всю логіку складання. Конструктор кузова точно знає, де мають бути розташовані отвори для датчиків та масляні канали, оскільки вони вбудовані в архітектуру моделі.

Відстежуваність. Якщо конструктор обирає товщину стінки кузова для зменшення ваги, модель MBSE негайно відображає попередження: «Попередження! Ця зміна порушує Вимогу 4.2 щодо максимального рівня вібрації трансмісії (NVH)».

Співпраця без суперечок. Конструктори механізмів, оцінювачі та розробники програмного забезпечення для коробок передач використовують одну

й ту саму модель MBSE (зазвичай створену в SysML), що забезпечує їхню синхронізовану роботу.

Модель MBSE трансформується завдяки штучному інтелекту (ШІ) та концепції цифрових двійників наступним чином. Помічники ШІ допомагають автоматично конвертувати текстові технічні специфікації від клієнтів у графічні блоки моделі MBSE. Модель MBSE – це «мозок», який керує симуляціями. Вона може автоматично видавати команди програмному забезпеченню (наприклад, Ansys або SolidWorks) для проведення стрес-тесту, передачі необхідних сил з кінематичної схеми, отримання результату та включення його в архітектуру проєкту.

Ручне створення та підтримка моделей SysML було пов'язано з величезною кількістю паперової роботи та бюрократії, що зазвичай не подобалося інженерам-конструкторам. Саме тут сучасні інженерні інструменти на базі ШІ значно полегшують життя. Сучасні моделі ШІ (наприклад, інтегровані з системами Cameo або Capella) можуть зчитувати текстові документи клієнтів (PDF/Word з військовими стандартами), розпізнавати технічні вимоги та автоматично будувати основні блоки та з'єднання на діаграмах. Це економить тижні рутинної роботи. Наприклад, виникли проблеми коли конструктор змінює радіус вала в SolidWorks/NX, але системний архітектор забуває змінити параметр у Cameo. Агенти ШІ відстежують зміни в геометрії CAD, аналізують їх та автоматично оновлюють параметричні діаграми в SysML, сигналізуючи про виникнення неузгодженого конфлікту.

Перед надсиланням моделі замовнику (наприклад, Airbus, Lockheed Martin або військовому відомству) ШІ перевіряє архітектуру на відповідність стандартам моделювання. Він перевіряє, чи всі блоки мають інтерфейси, чи є якісь «висіючі» вимоги, які не мають апаратної прив'язки, та чи правильно створені з'єднання.

Висновки

1. В умовах інтелектуалізації інженерних процесів проєктна діяльність зазнає значної трансформації, набуваючи характеристик цифрової інтелектуальної системи управління створенням інноваційних технологій. Обґрунтовано, що

ефективність проектування інноваційних технологій значною мірою визначається рівнем управління якістю проєктної діяльності, який повинен охоплювати не лише контроль технічних параметрів, але й управління інноваціями, цифровізацію, інтеграцію та адаптивність інженерних процесів. Використання технологій штучного інтелекту, цифрових двійників, генеративного проектування, великих наборів даних та автоматизованих систем підтримки прийняття інженерних рішень створює умови для розробки нової моделі інтелектуалізації конструкторської діяльності..

2. Запропоновано систему підходів, що забезпечують ефективне проектування інноваційних технологій, засновану на інтеграції системних, процесних, цифрових, інтелектуальних, адаптивних та інтегративних механізмів до управління якістю проєктної діяльності. Інженерія штучного інтелекту (ШІ) – це підхід до проектування та розробки (зазвичай програмного забезпечення), за якого інструменти ШІ інтегруються в кожен етап робочого процесу для розширення людських можливостей. Підкреслено, що не в тому, щоб замінити програмістів чи інженерів нейронними мережами, а в тому, щоб прийняти модель співпраці, в якій ШІ автоматизує рутинні завдання, поки люди зосереджуються на архітектурі та прийнятті рішень. Ключова концепція полягає у використанні генеративних моделей та спеціалізованих плагінів як інтелектуальних помічників.

3. Відбувається зміна ролі людей: інженери переходять від безпосередніх виконавців до архітекторів, технічних керівників або «директорів» процесу розробки. ШІ може генерувати шаблони, рефакторувати застарілий код або перевіряти системи на наявність помилок за лічені секунди. Проектування процесу будується з нуля з припущенням, що значна частина технічної роботи буде виконана алгоритмом.

Перспективи подальших досліджень включають розробку методології оцінки якості проєктної діяльності в контексті цифрової трансформації промисловості та встановлення системи КРІ ефективності інтелектуалізованої інженерії.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Architecture to Geometry – Integrating System Models with Mechanical Design Dr. Manas Bajaj¹ and Dr. Dirk Zwemer² Intercax, 75 5-th Street NW, Suite 312, Atlanta, GA 30308, USA Dr. Bjorn Cole³ NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91105, USA Model-Based Systems URL: https://www.omg.org/sysml/Arch-to-Geom_Bajaj-Cole-Zwemer_Space-2016.pdf
2. Model Based System Engineering (MBSE) Approach for Total Lifecycle Sustainment – Phase III. URL: <https://ncms.org/ctma-project/model-based-system-engineering-mbse-approach-for-total-lifecycle-sustainment-phase-iii/>
3. Interoperability of CAD models and SysML specifications for the automated checking of design requirements. URL: <https://hal.science/hal-03799130v1/document>
4. Text to model via SysML: Automated generation of dynamical system computational models from unstructured natural language text via enhanced System Modeling Language diagrams. Matthew Anderson Hendricks, Alice Cicirello/Computation and Language (cs.CL); Artificial Intelligence (cs.AI); Computational Engineering, Finance, and Science (cs.CE) arXiv:2507.06803 [cs.CL] (or arXiv:2507.06803v3 [cs.CL] for this version). Focus to learn more URL: <https://arxiv.org/abs/2507.06803>
5. Нагорняк Г. С., Ханнуф К. Є. Ісобливості викликів та можливостей формування інтелектуального капіталу підприємств машинобудівного комплексу України в умовах цифровізації. (2823). *Review of transport economics and management*, (8(24)). 54–71. <https://doi.org/10.15802/rtem2022/277123>
6. Пінчук О. (2025). Штучний інтелект як інструмент розвитку інновацій у машинобудуванні. *Економіка та суспільство*, (77). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-77-109>
7. Мехович К. С. Місце маркет-форсайту в теорії ефективності інноваційного маркетингу. *Енергетика, енергозбереження, енергоаудит*. № 2 (205). 2025. С. 62–88. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.02.05>.
8. Мехович К. С. Теоретико-методичні засади використання технології маркет-форсайту в ІТ сфер. *Енергетика, енергозбереження, енергоаудит*. № 11 (202) 2024. С. 48–63. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2024.11.04>.
9. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>
10. World Bank. (2021). Digital transformation of the manufacturing sector. Washington, DC: World Bank, pp.41–42.
11. Суботін О. О., Новіков Д. В. Застосування штучного інтелекту для автоматизації роботизованих процесів. *Молодий вчений*, 2025. № 2(133). С. 85–90. URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/6379> (дата звернення: 30.08.2025).
12. Красношарпа Н., Малієнко С., Гуда А., Селив'ярова Т. Застосування штучного інтелекту для розв'язання інженерних задач: переваги та виклики. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*, 2024. № 1. С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.080> (дата звернення: 30.08.2025).
13. Голубовський М. П., Ясній В. П. Огляд застосування штучного інтелекту та машинного навчання у прикладній механіці. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, 2024. № 1(56). С. 79–91. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-79-91](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-79-91) (дата звернення: 30.08.2025).
14. Ключ Ю. І., Гуменюк В. В. Використання штучного інтелекту в бізнес-процесах підприємства. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*,

2025. № 3(289). С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-289-3-21-27> (дата звернення: 30.08.2025).

15. Баджадж М., Звемер Д., Фунг А., Интема Р., Кумар А., Вайкар М., Двіведі А. «MBSE. Основи розширеної системної інженерії на основі моделей протягом життєвого циклу системи». 26-й щорічний Міжнародний симпозиум INCOSE, Единбург, Шотландія, Велика Британія, 18–21 липня 2016 р.

16. Коул Б. та Дженкінс С.Дж. «З'єднання вимог з архітектурою та аналізом за допомогою системної інженерії на основі моделей», AIAA Infotech @ Aerospace, AIAA SciTech, (AIAA 2015-1116), <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-1116>

REFERENCIS:

1. Architecture to Geometry – Integrating System Models with Mechanical Design Dr. Manas Bajaj¹ and Dr. Dirk Zwemer² Intercax, 75 5th Street NW, Suite 312, Atlanta, GA 30308, USA Dr. Bjorn Cole³ NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91105, USA Model-Based Systems URL: https://www.omg.org/sysml/Arch-to-Geom_Bajaj-Cole-Zwemer_Space-2016.pdf

2. Model Based System Engineering (MBSE) Approach for Total Lifecycle Sustainment – Phase III URL: <https://ncms.org/ctma-project/model-based-system-engineering-mbse-approach-for-total-lifecycle-sustainment-phase-iii/>

3. Interoperability of CAD models and SysML specifications for the automated checking of design requirements. URL: <https://hal.science/hal-03799130v1/document>

4. Text to model via SysML: Automated generation of dynamical system computational models from unstructured natural language text via enhanced System Modeling Language diagrams. Matthew Anderson Hendricks, Alice Cicirello/Computation and Language (cs.CL); Artificial Intelligence (cs.AI); Computational Engineering, Finance, and Science (cs.CE) arXiv:2507.06803 [cs.CL] (or arXiv:2507.06803v3 [cs.CL] for this version) . Focus to learn more URL: <https://arxiv.org/abs/2507.06803>

5. Nahorniak H. S., Khannuf K. Ye. Isoblyvosti vyklykiv ta mozhlyvostei formuvannia intelektualnogo tkapitalu pidpriemstv mashynobudivnogo kompleksu Ekrainy v umovakh tsyfrovizatsii. (2823). *Review of transport economics and management*, (8(24), 54–71. <https://doi.org/10.15802/rtem2022/277123>

6. Pinchuk O. (2025). Shtuchnyi intelekt yak instrument rozvytku innovatsii u mashynobuduvani. *Ekonomika ta suspilstvo*, (77). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-77-109>

7. Mekhovych K. S. Mistse market-forsaitu v teorii efektyvnosti innovatsiinoho marketynhu. *Enerhetyka, enerhozberezhennia, enerhoaudyt*. № 2 (205). 2025. S. 62–88. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.02.05>.

8. Mekhovych K. S. Teoretyko-metodychni zasady vykorystannia tekhnolohii market-forsaitu v IT sfer. *Enerhetyka, enerhozberezhennia, enerhoaudyt*. №11 (202) 2024. S. 48–63. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2024.11.04>.

9. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>

10. World Bank. (2021). Digital transformation of the manufacturing sector. Washington, DC: World Bank. pp.41–42.

11. Subotin O. O., Novikov D. V. Zastosuvannia shtuchnogo intelektu dlia avtomatyzatsii robotyzovanykh protsesiv. *Molodyi vchenyi*, 2025. № 2(133). S. 85–90. URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/6379> (data zvernennia: 30.08.2025).

12. Krasnoshapka N., Maliienko S., Huda A., Selyvorstova T. Zastosuvannia shtuchnoho intelektu dlia rozviazannia inzhenernykh zadach: perevahy ta vyklyky. *Informatsiini tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2024. № 1. S. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.080> (data zvernennia: 30.08.2025).
13. Holubovskiy M. P., Yasnii V. P. Ohliad zastosuvannia shtuchnoho intelektu ta mashynnoho navchannia u prykladnii mekhanitsi. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*, 2024. № 1(56). S. 79–91. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-79-91](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-79-91) (data zvernennia: 30.08.2025).
14. Klius Yu. I., Humeniuk V. V. Vykorystannia shtuchnoho intelektu v biznes-protsesakh pidpriemstva. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 2025. № 3(289). S. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-289-3-21-27> (data zvernennia: 30.08.2025).
15. Badzhadzh M., Zvemer D., Funh A., Intema R., Kumar A., Vaikar M., Dvivedi A. «MBSE. Osnovy rozshyrenoi systemnoi inzhenerii na osnovi modelei protiahom zhyttievoho tsykladu systemy». 26-y shchorichnyi Mizhnarodnyi symposium INCOSE, Edynburh, Shotlandiia, Velyka Brytaniia, 18–21 lypania 2016 r.
16. Koul, B. ta Dzhenkins, S.Dzh. «Ziednannia vymoh z arkhitekturoiu ta analizom za dopomohoiu systemnoi inzhenerii na osnovi modelei», AIAA Infotech @ Aerospace, AIAA SciTech, (AIAA 2015-1116), <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-1116>

Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.04.2026;

прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали і дали згоду рукопису.

The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.04.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.