

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(050)638-81-54, evgentrush80@gmail.com

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

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ ГНУЧКОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ (ГІКВС)

Анотація. У статті розглянуто теоретико-методологічні та прикладні аспекти моделювання організаційно-економічної трансформації конструкторської діяльності в умовах діджиталізації промислових підприємств. Визначено ключові тенденції переходу від традиційних підходів проектування до цифрово-інтелектуальних систем, заснованих на інтеграції CAD/CAE/CAM-технологій, штучного інтелекту, цифрових двійників та хмарних платформ. Запропоновано концептуальну модель трансформації конструкторської діяльності, яка відображає взаємозв'язок між рівнем цифрової зрілості підприємства, структурою управління проектами, компетенціями персоналу та ефективністю інноваційних процесів. Розроблена модель дозволяє оцінювати економічний ефект від впровадження цифрових технологій за показниками скорочення тривалості конструкторського циклу, зниження витрат на розробку та підвищення якості виробів. Проведене моделювання підтверджує, що цифровізація забезпечує не лише технічну модернізацію процесу проектування, але й формує нові організаційно-економічні механізми управління знаннями, колаборацією та інноваціями. Результати можуть бути використані для формування стратегій розвитку інженерних підрозділів, побудови цифрових платформ конструкторської діяльності та обґрунтування напрямів інвестицій у технології Industry 4.0.

Ключові слова: діджиталізація, цифровий двійник, трансформація, моделювання, гнучка інтелектуально-конструкторська система.

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(050)638-81-54, evgentrush80@gmail.com

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

THEORETICAL PRINCIPLES OF CREATING A FLEXIBLE INTELLECTUAL DESIGN PRODUCTION SYSTEM (FIDPS)

Abstract. *The article considers theoretical, methodological and applied aspects of modeling the organizational and economic transformation of design activities in the context of digitalization of industrial enterprises. The key trends of the transition from traditional design approaches to digital-intelligent systems based on the integration of CAD/CAE/CAM technologies, artificial intelligence, digital twins and cloud platforms are identified. A conceptual model of the transformation of design activities is proposed, which reflects the relationship between the level of digital maturity of the enterprise, the structure of project management, personnel competencies and the efficiency of innovation processes. The developed model allows us to assess the economic effect of the implementation of digital technologies in terms of reducing the duration of the design cycle, reducing development costs and improving product quality. The modeling conducted confirms that digitalization provides not only technical modernization of the design process, but also forms new organizational and economic mechanisms for knowledge management, collaboration and innovation. The results can be used to form development strategies for engineering departments, build digital platforms for design activities and justify investment directions in Industry 4.0 technologies.*

Keywords: *digitalization, digital twin, transformation, modeling, flexible intellectual design system.*

Актуальність теми полягає в тому, що діджиталізація промисловості зумовлює глибоку трансформацію конструкторської діяльності, змінюючи її організаційно-економічні засади. Впровадження технологій CAD/CAE/PLM, Generative Design, Digital Twin та AI створює нові можливості для підвищення ефективності проєктування, але водночас висуває вимоги до оновлення моделей управління та оцінювання результативності. Багато підприємств, особливо малого та середнього бізнесу, стикаються з проблемами інтеграції цифрових рішень і нестачею методичних підходів до економічного обґрунтування цифрових інновацій. Тому виникає потреба у науковому моделюванні організаційно-економічної трансформації конструкторських процесів, що враховує взаємозв'язок технологічних, ресурсних та управлінських факторів. Розроблення таких моделей сприятиме формуванню ефективних стратегій цифрового розвитку підприємств, підвищенню їх конкурентоспроможності та скороченню інноваційних циклів. Стрімке поширення технологій AI, Big Data, IoT, Cloud Manufacturing, Generative Design створює передумови для радикального оновлення підходів до організації конструкторської діяльності – від персоніфікованого цифрового робочого місця до віртуальних інженерних команд і розподілених цифрових виробничих платформ. Ці процеси потребують наукового моделювання механізмів організаційно-економічної трансформації, що забезпечують баланс між технологічними можливостями, ресурсними

обмеженнями та економічною доцільністю впровадження. Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю:

- а) наукового обґрунтування моделей цифрової трансформації конструкторської діяльності, які враховують взаємозв'язок технологічних, організаційних та економічних чинників;
- б) розроблення методичного інструментарію оцінювання ефективності цифрових змін на рівні підприємства і кластерів;
- в) пошуку оптимальних сценаріїв інтеграції інтелектуальних систем у процеси проєктування з урахуванням економічної доцільності, гнучкості та сталого розвитку.

Розв'язання цих завдань має не лише теоретичне, але й прикладне значення – воно сприятиме підвищенню ефективності інженерно-конструкторських підрозділів, оптимізації структури витрат, прискоренню інноваційних циклів і підвищенню рівня цифрової зрілості промислових підприємств. Воно також обумовлено наявністю об'єктивних передмов для обґрунтування гнучкої інтелектуально-конструкторської виробничої системи (ГІКВС).

Аналіз останніх публікацій. Останні роки питанням, що пов'язані із діджиталізацією у світі приділяється дуже багато уваги. Китайські дослідники Байкунь Ван та інші у [1] наводять багато свіжих оглядів і кейс-досліджень про те, як цифровий двійник поєднує PLM/CAD/CAE з експлуатаційними даними і дає зворотний зв'язок конструктору (2020). Це центральний елемент сучасної інтеграції «конструктор-виробництво». Практичний інтерес представляють публікації огляду архітектур цифрових двійників (DT) для виробничих систем [2, 3]. У цих працях автори пропонують класифікацію типів DT, механізмів інтеграції CAD/CAE/CAM та визначає роль AI. Корисні для узагальнення задач ГІКВС теретичні підходи до розкриття методологічної основи цифрової інтеграції конструктора й виробництва і аналіз ключових технологій Industry 4.0: IoT, AI, Cloud, Robotics. Цікаве дослідження [4], у якому автори обґрунтували як поєднання сенсорики, цифрових моделей та AI забезпечує адаптивність виробництва. Релевантним для розробки модулів гнучкості ГІКВС є огляд

комплексних методів забезпечення гнучкості у виробництві: гнучкі осередки, автономні роботи, адаптивні технологічні маршрути [5]. Корисною для побудови інтеграційної моделі ГІКВС та цифрового ланцюга створення продукту є публікація про інтеграцію PLM з MES/ERP/SCADA. [6] Критично важливим для побудови моделі ГІКВС та її відповідності світовим практикам представляється Міжнародний стандарт DT для виробництва [7], а також опис технологічних цифрових двійників обладнання для створення мікрорівневих інтелектуальних модулів ГІКВС [8]. Офіційний документ щодо цифрової трансформації промисловості ЄС дає політичний і стратегічний контекст впровадження ГІКВС [9]. Практичний інтерес для формування архітектурних принципів ГІКВС представляє промисловий огляд цифрової інженерії, PLM, Digital Twin і симуляційного виробництва [10]. Теоретико-прикладна робота про алгоритмічне проектування також релевантна для інтелектуальної компоненти ГІКВС у проектуванні виробів [11]. Практичні приклади побудови інтеграційного конструкторсько-виробничого циклу викладено у корпоративному дослідженні інтегрованих віртуальних моделей у промисловості. Різні підходи побудови циклів корисні для удосконалення системи управління мережеских формувань [12]. Наукову базу ГІКВС і методологію вимірювання та проектування гнучкості в Україні підсилюють вітчизняні дослідження ролі автоматизації і цифрових платформ у промисловості, аналіз структурної і технологічної гнучкості на підприємствах, теоретичні підходи до обґрунтування інтеграції CAD–CAM–MES у машинобудуванні, підходи до проектування кіберфізичних виробничих систем та дослідження CPPS у контексті Industry 4.0, передові дослідження колаборативної робототехніки та теоретичної бази цифрової інженерії: lifecycle, верифікація моделей, хмарні симуляції [13–20]. Зазначені публікації дають можливість всебічного обґрунтування теоретичних засад моделювання організаційно-економічної трансформації конструкторської діяльності в умовах діджиталізації промислових підприємств.

Викладення основного матеріалу. Інженерно-конструкторська діяльність є базовою ланкою інноваційного циклу, а її ефективність значною мірою визначає

конкурентоспроможність підприємств. Проте більшість промислових організацій, особливо малих і середніх, зіштовхуються з проблемами адаптації до діджиталізації: відсутність комплексних моделей цифрової інтеграції, недостатній рівень цифрових компетентностей кадрів, фрагментарність використання CAD/CAE/PLM-рішень, а також складність економічного оцінювання ефектів цифрових трансформацій.

Сучасні тенденції розвитку промисловості визначаються інтенсивним впровадженням цифрових технологій, які докорінно змінюють організаційно-економічні засади конструкторської діяльності. Трансформація традиційних процесів проектування відбувається під впливом концепцій Industry 4.0, розумне виробництво (Smart Manufacturing), цифрова інженерія (Digital Engineering) та цифровий двійник (Digital Twin), що формують нові вимоги до організації праці, структури підприємств і систем управління життєвим циклом продукції.

Модель організаційно-економічної трансформації конструкторської діяльності під впливом процесів діджиталізації можна уявити як систему взаємопов'язаних рівнів змін, які охоплюють технології, організацію праці та економіку. Сутність моделі полягає у формуванні концептуальної рамки, що пояснює цілу низку процесів: як діджиталізація змінює організацію праці конструктора (роль, функції, компетенції); який використовується інструментарій (цифрові платформи, AI, цифрові двійники, PLM, CAD/CAE/CAM-системи); очікувані економічні результати (продуктивність, інноваційність, скорочення витрат, швидкість виходу продукту на ринок). Сформуємо основні складові такої моделі (рис. 1).

Вхід (чинники трансформації): розвиток технологій Industry 4.0/5.0; попит на індивідуалізовану продукцію; глобальна конкуренція; інтеграція AI, big data, IoT у проектування.

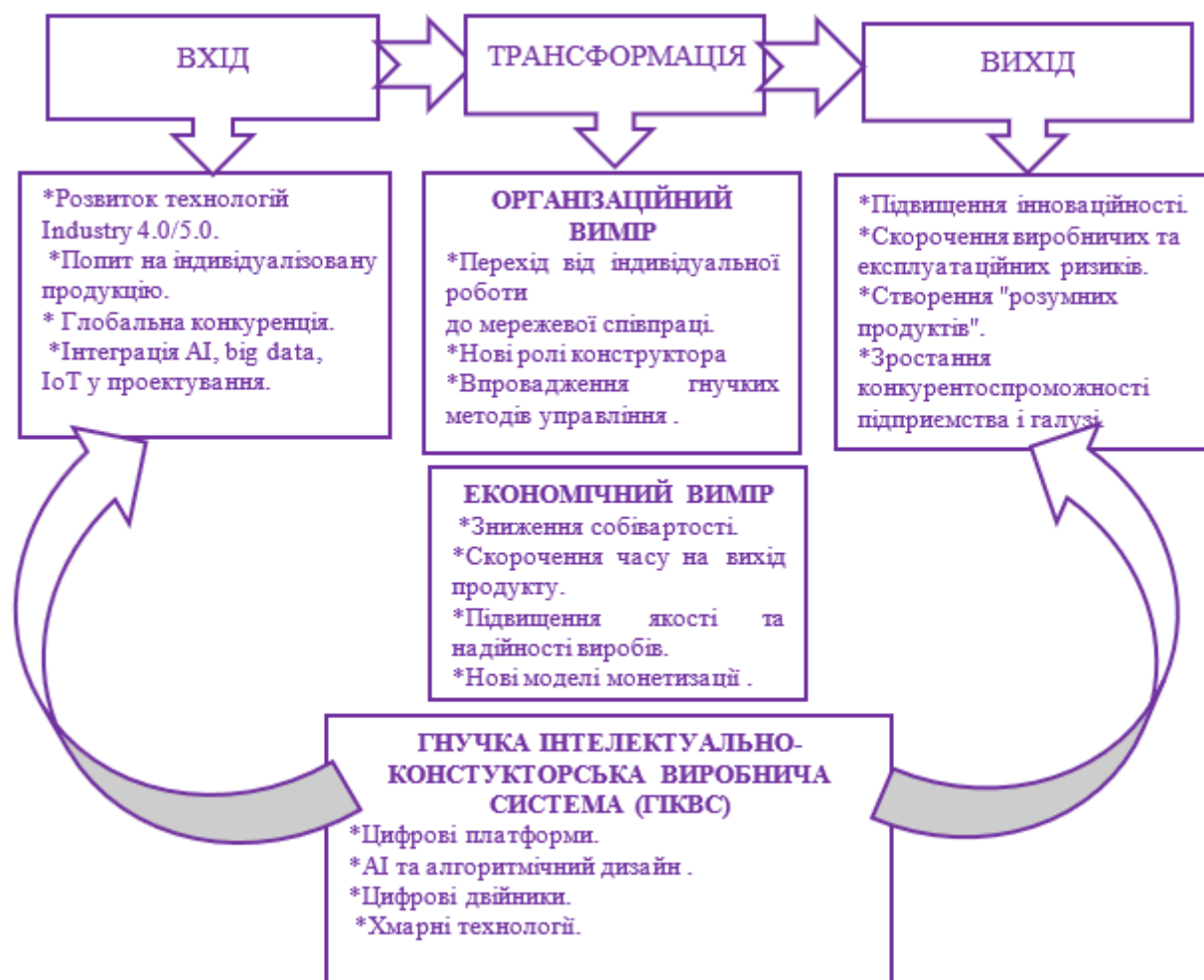


Рисунок 1 – Складові моделі трансформації конструкторської діяльності під впливом процесів діджиталізації.

Трансформація:

а) *організаційний вимір*: перехід від індивідуальної роботи до мережевої співпраці (хмарні платформи, колективне проектування); нові ролі конструктора: не лише креслення, а й аналіз даних, симуляції, оптимізація; впровадження гнучких методів управління (Agile, Scrum для R&D);

б) *економічний вимір*: зниження собівартості завдяки цифровим двійникам та симуляціям (менше фізичних прототипів); скорочення часу на вихід продукту (time-to-market); підвищення якості та надійності виробів; нові моделі монетизації (сервіси на основі даних, прогнозне обслуговування);

в) *технологічне ядро* (цифрова екосистема конструктора): цифрові платформи: інтеграція ERP, PLM, CAD/CAE, MES; AI та алгоритмічний дизайн (generative

design); цифрові двійники: прогнозування життєвого циклу виробу; хмарні технології: спільний доступ до моделей у режимі реального часу.

Вихід (результати трансформації): підвищення інноваційності; скорочення виробничих та експлуатаційних ризиків; створення «розумних продуктів» з довготривалим життєвим циклом; зростання конкурентоспроможності підприємства і галузі.

Для конструктора модель – це орієнтир нових компетенцій (AI, робота з платформами, системне мислення). Для підприємства – розуміння, як вкладення у діджиталізацію трансформують економіку проектування. Для науки – база для подальших досліджень ефективності цифровізації в інженерній сфері.

Для конструкторської діяльності в умовах діджиталізації ключова роль належить оборотному (зворотному) зв'язку з виробництвом, бо без нього трансформація буде однобічною. Визначимо основні моменти цього зв'язку.

1. *Цифровий цикл виробу (Digital Product Lifecycle)* починається із створення конструкторської документації. Далі цикл продовжується у виробництві та експлуатації. Ці процеси накопичують аналіз та робочі експлуатаційні характеристики, завдяки якому конструктор отримує інформацію про фактичну якість, дефекти, навантаження, витрати, тощо.

2. *Роль цифрових двійників і IoT.* Цифрові двійники – це точні віртуальні копії фізичних об'єктів, процесів або систем, які оновлюються в режимі реального часу за допомогою даних з датчиків. Їх використовують для аналізу, моделювання, тестування та оптимізації реальних процесів без фізичного втручання, що дозволяє швидше виявляти проблеми та покращувати продукти. Узагальнемо, як працюють цифрові двійники. Збір даних: цифровий двійник отримує дані з реального об'єкта через Інтернет речей (IoT) та інші датчики. Дані візуалізуються у вигляді цифрової моделі, яку можна аналізувати для виявлення аномалій та неточностей. Інженери можуть проводити симуляції, щоб протестувати різні сценарії та вдосконалити процеси, не впливаючи на фізичний об'єкт. Завдяки постійному надходженню даних, цифрові двійники допомагають приймати кращі, більш обґрунтовані рішення.

Інтернет речей (IoT) – це мережа фізичних пристроїв (від побутової техніки до промислового обладнання), які мають вбудовані датчики, програмне забезпечення та підключення до інтернету, що дозволяє їм збирати та обмінюватися даними з іншими пристроями. Ці датчики, які є ключовим компонентом, збирають інформацію з навколишнього середовища, наприклад, вологість ґрунту або температуру, і передають її для аналізу, що дозволяє автоматизувати процеси та приймати рішення в режимі реального часу.

Розберемось як це працює.

Датчики: фізичні пристрої, які вимірюють певні показники навколишнього середовища (температуру, тиск, вологість, рух тощо).

Підключення: дані з датчиків передаються через різні мережі (Wi-Fi, мобільний інтернет, Bluetooth) до хмарних платформ або інших пристроїв.

Платформи/обробка даних: хмарні платформи збирають, обробляють та аналізують великі обсяги даних, що дозволяє виявляти тенденції, генерувати сповіщення та автоматизувати дії.

На основі аналізу даних система може виконувати певні дії без втручання людини, наприклад, автоматично вмикати систему поливу в сільському господарстві, якщо датчик показує низьку вологість ґрунту. У промисловості цифрові двійники використовуються для оптимізації виробничих ліній, моніторингу обладнання та вдосконалення продуктів.

IoT, або Інтернет речей – це концепція мережі фізичних пристроїв з вбудованими датчиками та програмним забезпеченням, які можуть обмінюватися даними між собою та з комп'ютерними системами через інтернет у автоматичному режимі. Це дозволяє здійснювати моніторинг, керування та автоматизацію процесів, об'єднуючи фізичний світ з цифровими технологіями. Пристрої з датчиками (наприклад, смарт-годинники, датчики вологості ґрунту, камери спостереження) збирають інформацію про навколишнє середовище. Зібрані дані передаються через мережу (Wi-Fi, Bluetooth, мобільний інтернет тощо) до хмарної платформи для обробки. Спеціалізоване програмне забезпечення аналізує дані, щоб виявити закономірності та прийняти рішення. На основі аналізу, система може автоматично виконувати дії, наприклад, вмикати

полив, якщо датчик показує низьку вологість ґрунту, або надсилати сповіщення користувачеві. Таким чином, Digital Twin збирає дані у реальному часі з виробничих ліній і продукту під час експлуатації, а конструктор отримує «живі» дані для оптимізації рішень.

Ефект зворотного зв'язку проявляється у зменшенні кількості прототипів (більше моделювання, менше реальних експериментів), швидшому виявленні помилок у конструкції, оптимізації матеріалів та процесів, скороченні *time-to-market*. До організаційних аспектів належить інтеграція CAD/PLM ↔ MES/ERP. При цьому конструктор вже не «відірваний» від цеху, а є частиною наскрізного цифрового потоку. Тобто модель стає не лише Вхід → Перетворення → Вихід, а Вхід ↔ Перетворення ↔ Вихід ↔ Зворотній зв'язок (Input → Transformation → Output, а Input ↔ Transformation ↔ Output ↔ Feedback, де Feedback) У новій моделі дані з виробництва і експлуатації знову «підживлюють» конструкторську діяльність.

Як усе це вписується у концепцію гнучкої інтелектуально-конструкторської виробничої системи (ГІКВС). На нашу думку, ця концепція повинна бути основою моделі, а сама модель створена у вигляді ГІКВС. Якщо ми говоримо про трансформацію конструкторської діяльності, то концепція гнучкої інтелектуально-конструкторської виробничої системи (ГІКВС) цілком може стати теоретичною та методологічною основою моделі. Пояснимо це ствердження.

1. *Гнучкість (Flexibility)*. Конструкторська діяльність повинна швидко адаптуватися під зміни ринку, технологій, вимог клієнта. Це означає можливість перебудови виробничих і проектних процесів у режимі реального часу.

2. *Інтелектуальність (Intelligence)*. Використання AI, цифрових двійників, алгоритмічного дизайну (Generative Design), великих даних. Система сама генерує оптимальні рішення, пропонує варіанти, прогнозує наслідки.

3. *Конструкторська складова*. Конструктор не просто створює креслення, а працює у середовищі, де проект одразу перевіряється на технологічність, вартість, ризики. При чому CAD/CAE/PLM інтегровані з MES/ERP, а результат «живе» у цифровій платформі.

4. *Виробнича складова.* Має місце реальний зворотний зв'язок із цехом та експлуатацією (через IoT і Digital Twin), а конструктор бачить, як його рішення працюють на практиці, і може одразу вносити зміни.

5. *Організаційно-економічна інтеграція.* У ГІКВС поєднуються організаційні аспекти (нові ролі конструктора, командна робота, цифрова культура) та економічні аспекти (зменшення витрат, прискорення time-to-market, підвищення інноваційності).

Редставим концепцію ГІКВС як основу моделі. Модель організаційно-економічної трансформації пропонується побудувати наступним чином : ядро моделі - ГІКВС (як інтеграційна рамка), складові - організаційні, економічні та технологічні рівні. Принцип роботи: цифровий цикл *«Конструктор – Виробництво – Експлуатація – Зворотний зв'язок»*. Результат – інноваційність, ефективність, конкурентоспроможність.

Таким чином, *модель трансформації конструкторської діяльності під впливом діджиталізації (ГІКВС) представляє концептуальну базу, де конструктор не замінюється AI і платформами, а стає координатором та інтегратором інтелектуальних цифрових інструментів у виробничому процесі.* Принципово важливо, що ГІКВС не передумова, а є результат діджиталізації та трансформації конструкторської діяльності.

ГІКВС – це не блок. Це оболочка всієї трансформації. Усе що стосується системи *«Діджиталізація→Трансформація→Рівні→Зворотний цикл»* предствляє собою гнучку систему – ГІКВС. Це як ГВС у виробництві, а у нас – у конструюванні. Я так собі представляю, і також як у ГВС є оброблювальні центри, промислові роботи, програми, оперетори станків; у ГІКВС – це конструктор і все, що його оточує внаслідок процесів діджиталізації. ГІКВС не просто фінальний блок чи результат, а «оболонка», рамкова система, яка охоплює весь процес трансформації конструкторської діяльності.

ГІКВС у своїй сутності виконує задачі копії ГВС (гнучку виробничу систему) у наступному:

а) у ГВС є обладнання, роботи, верстати, програми, оператори, які працюють у єдиному інтегрованому середовищі;

б) у ГІКВС – «робочими центрами» виступають конструктор, цифрові двійники, платформи, AI, PLM, хмарні сервіси, зворотні зв'язки з виробництва та експлуатації.

Гнучкість виробництва – це його здатність робити широку номенклатуру виробів і швидко і економічно здійснювати перехід від випуску одного до випуску іншого типу виробів. Відповідно до цього гнучке виробництво повинне мати наступні три властивості: робити широку номенклатуру виробів; швидко і економічно переходити від випуску одного до випуску іншого типу виробів в межах встановленої номенклатури; допускати зміни номенклатури виробів, що випускаються, без зміни його технологічного оснащення. ГВС – це виробнича система, що реалізовує гнучкий автоматичний процес виробництва і є взаємоузгодженою сукупністю верстатів з числовим програмним управлінням, промислових роботів, автоматичних транспортних засобів, автоматичних складів, центрального комп'ютера, що управляє, і обслуговуючих усі ці засоби працівників.

Гнучка інтелектуально-конструкторська-виробнича система (ГІКВС) – це логічний новий етап розвитку класичних гнучких виробничих систем (ГВС) і сучасних цифрових підходів. Фактично це інтегрована цифрово-інтелектуальна платформа, що поєднує функції проектування, конструювання, виробництва та управління життєвим циклом продукції у єдиному адаптивному середовищі. Вона здатна самонавчатися, адаптуватися до змін середовища та оптимізувати процеси в реальному часі за допомогою штучного інтелекту, цифрових двійників, хмарних сервісів та мережевої взаємодії. Її сутність можна позначити як еволюцію від гнучкого виробництва до гнучкого проектування та виробництва. ГІКВС охоплює не лише виробничі потужності, а й етапи інженерного проектування, конструкторської підготовки та управління знаннями. Інтелектуальність системи забезпечується впровадженням алгоритмів ШІ (для прогнозування, оптимізації, автоматизації рішень), цифрових двійників (для симуляції й тестування) та

інтегрованих баз знань (для швидкої зміни конструкцій і технологій). Система автоматично перебудовує виробничі й конструкторські процеси під зміни ринку, технологій, ресурсів. Її характерні ознаки полягають у наступному:

1. Інтеграція “проєктування–виробництво–експлуатація” у єдину цифрову платформу.
2. Використання ІІІ для підтримки конструкторських рішень та управління виробничими операціями.
3. Модульність: можливість швидкого додавання або заміни модулів (CAD, CAM, PLM, MES, ERP).
4. Цифрові двійники: створення й експлуатація віртуальних моделей виробів і процесів.
5. Гнучкість у ресурсах: перебудова виробничих ліній і конструкторських маршрутів без значних витрат часу.
6. Зворотний зв'язок від експлуатації: дані з реальної роботи продукту автоматично враховуються при вдосконаленні конструкції.

Її призначення у скороченні часу від ідеї до серійного виробництва (“time-to-market”), оптимізація витрат на конструкторську підготовку та виробництво, підвищенні якості й надійності продукції за рахунок моделювання та аналізу на ранніх етапах, створення умов для масової кастомізації продукції (виробництво під конкретного клієнта), збереженні й розвитку компетенцій конструкторів – вони стають операторами/архітекторами системи, а не лише виконавцями.

У класичних гнучких автоматизованих виробничих системах (ГВС) є центральний комп'ютер як “мозок”, що координує станки, роботи, транспортні системи. У випадку з ГІКВС ми маємо справу з більш складним рівнем: система включає і конструювання, і виробництво, і цифрових двійників, і зворотний цикл експлуатації. Тому центральний комп'ютер тут скоріше постає як інтелектуальний ядро-модуль, який управляє всією екосистемою. Побудуємо архітектуру ГІКВС. Її можна представити у наступному вигляді (рис. 2).

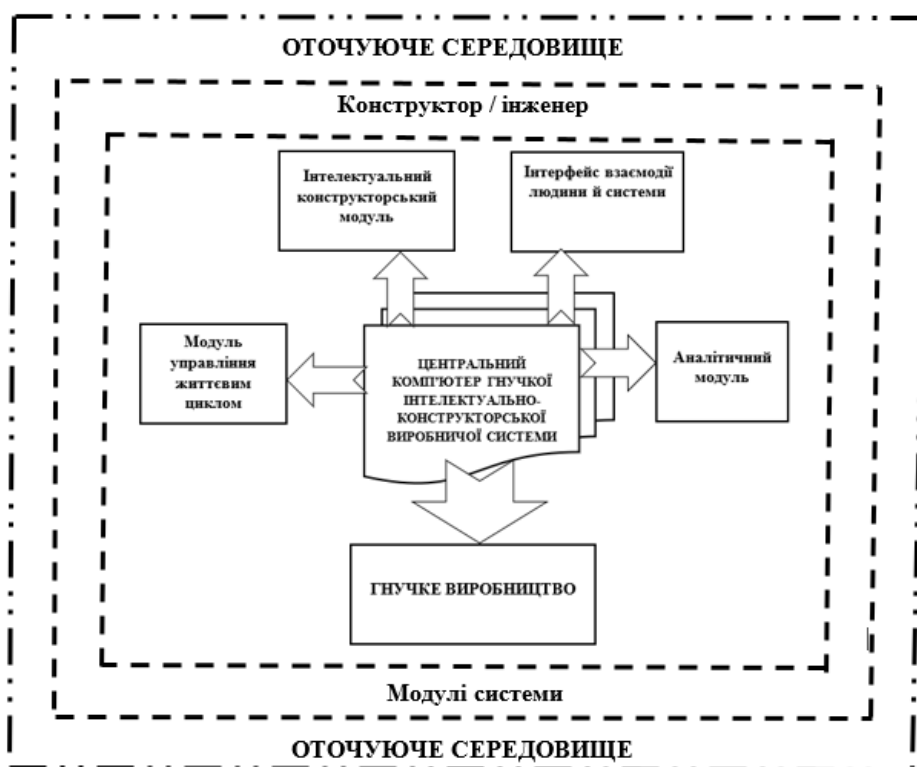


Рисунок 2 – Архітектура гнучкої інтелектуально-конструкторської системи (ГІКВС).

Центральний комп'ютер ГІКВС — це ядро управління, що виконує роль інтегратора та координатора між усіма модулями конструкторської, виробничої та управлінської діяльності. Він має інтелектуальну надбудову (AI) та базу знань, які дозволяють не лише керувати, а й прогнозувати, оптимізувати та навчатися.

Оточення ГІКВС і зв'язки.

1. Конструктор / інженер:

- отримує завдання, формулює технічні вимоги, затверджує проєктні рішення;
- взаємодіє через спеціалізовані інтерфейси (CAD/CAE, AR/VR, голосові помічники).

2. Модулі системи:

- інтелектуальний конструкторський модуль (CAD/CAE + AI-аналіз) відповідіє за створення конструкцій, симуляції;
- модуль управління життєвим циклом (PLM + цифрові двійники)забезпечує управління життєвим циклом виробу;
- аналітичний модуль (Big Data, прогнозування

- гнучке виробництво (MES/ERP, роботи, адитивні технології) здійснює управління виробничими процесами та здійснює управління ресурсами підприємства;
- інтерфейс взаємодії людини й системи (AR/VR, персональні панелі) забезпечує отримання даних з ринку та клієнтів.

Зовнішнє середовище: постачальники матеріалів (цифрова логістика), клієнти (зворотний зв'язок, кастомізація), ринок (аналітика, тренди), регулятори (стандарти, сертифікація).

3. Підлеглисть та ієрархія:

- конструктор / головний інженер – стратегічний рівень, визначає цілі;
- центральний комп'ютер ГІКВС – інтегратор і “мозок”, виконує роль головного координатора;
- локальні модулі (виробничі комп'ютери, CAD-станції, роботизовані комплекси) – тактичний рівень, підпорядковані центральному комп'ютеру;
- оператори, технічний персонал – виконують підтримку та локальні завдання.

4. Для забезпечення функціонування інноваційно-конструкторської системи потрібно спеціальне програмне забезпечення. Набір програмного забезпечення може бути наступним:

- системи проектування та моделювання: CAD/CAE, PDM, Digital Twin;
- системи управління виробництвом: MES, SCADA, APS (планування);
- інтегровані корпоративні системи: ERP, CRM;
- AI-платформи: машинне навчання, експертні системи, предиктивна аналітика;
- хмарні сервіси: обробка великих даних, колаборація;
- інтерфейси людино-машинної взаємодії: AR/VR, цифрові панелі, голосові інтерфейси.

До цього ще варто додати систему кіберзахисту (кібербезпека – критично важливо); механізм самонавчання (ML/AI – постійне вдосконалення); резервний контур управління (відмова центрального комп'ютера не повинна паралізувати

систему); модуль форсайт-аналітики (прогнозування ринку, технологічних трендів); цифрові двійники і виробу, і самого виробництва.

Ефективність функціонування ГВС залежить від спеціальних засобів, які представляють собою сукупність взаємозв'язаних автоматизованих систем проектування, технологічної підготовки виробництва, управління гнучкою виробничою системою і автоматичне переміщення предметів виробництва і технологічного оснащення. Виходячи з логіки ГВС, засоби забезпечення функціонування ГКВС – це все те, що робить систему реально працездатною. Як було показано вище, у гнучкій інтелектуально-конструкторській виробничій системі набір цих засобів ширший і більш інтелектуалізований, бо система включає не тільки виробництво, а й конструювання, цифрові двійники, велику базу даних та аналітику.

Висновки. У дослудженні ідентифіковано основні фактори цифрової трансформації конструкторської діяльності: автоматизація проєктних процесів, інтеграція цифрових платформ, впровадження систем штучного інтелекту для підтримки інженерних рішень та управління знаннями.

Побудовано модель організаційно-економічної трансформації, яка відображає етапи переходу від класичних схем проектування до цифрово-інтелектуальних середовищ, з урахуванням технічних, управлінських та кадрових аспектів.

Обґрунтовано вплив цифрової зрілості підприємства на результативність конструкторської діяльності: зростання рівня цифровізації призводить до скорочення часу проектування, зниження витрат та підвищення точності конструкторських рішень.

Доведено необхідність перегляду організаційної структури управління проєктами – від лінійно-функціональної до мережево-платформної, що забезпечує гнучкість, колаборацію та інтеграцію знань у режимі реального часу.

Розроблена модель може бути використана як інструмент стратегічного планування цифрової трансформації інженерних підрозділів і формування політики розвитку цифрової компетентності персоналу.

Доведено, що компетентнісний профіль конструктора майбутнього формується на перетині цифрового інжинірингу, аналітики, прогнозного моделювання та управління життєвим циклом продукту. Конструктор 2030 – це фахівець, здатний не лише створювати геометрію та креслення, а й управляти даними, моделювати поведінку систем у реальному часі, проєктувати інтелектуальні конструкції та забезпечувати конкурентоспроможність продуктів у довгостроковій перспективі.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для створення цифрових інженерних екосистем, побудови систем управління життєвим циклом виробів (PLM) та оцінювання економічного ефекту від цифровізації конструкторської діяльності.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Wang B. et al. (2023) Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: Comparative Review URL: https://www.researchgate.net/publication/343384802_Smart_Manufacturing_and_Intelligent_Manufacturing_A_Comparative_Review
2. Soori M. et al. (2023) Digital Twin in Smart Manufacturing: Integrative Review. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344423000099>
3. Fu Y. (2022) Digital Twin-Enabled Design-To-Manufacture Systems. URL: <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-022-00760-x>
4. Smart manufacturing systems for Industry 40 Conceptual framework scenarios and future perspectives/URL: <https://www.researchgate.net/publication/322673524>
5. Zhong R.Y. et al. (2022) Flexible Manufacturing and AI-Oriented Systems: Survey. URL: https://www.researchgate.net/publication/360580876_Enabling_flexible_manufacturing_system_FMS_through_the_applications_of_industry_40_technologies
6. Li X. et al. (2023) PLM-Integrated Smart Manufacturing Framework. <https://www.researchgate.net/journal/Sustainability>
7. ISO/IEC 23247 (2022) Digital Twin Framework for Manufacturing. URL: https://www.researchgate.net/publication/378099287_A_Manufacturing_Digital_Twin_Framework
8. Xu X. (2022) Machine Tool Digital Twins and Cyber-Physical Manufacturing. URL: https://www.researchgate.net/publication/376843087_Digital_Twin_of_Cyber-Physical_CNC_for_Smart_Manufacturing
9. European Commission (2023) Digital Industry Strategy and AI for Manufacturing. URL: <https://euobserver.com/eu-and-the-world/ar178848e4>
10. Siemens (2023) Xcelerator White Paper – Digital Engineering and Manufacturing Backbone. URL: https://www.leonardo.com/documents/15646808/29848048/PIJ_2025_N52.pdf?t=1741965054687
11. Autodesk Research (2022) Generative Design and AI-Based Engineering. URL: <https://www.klover.ai/autodesk-ai-strategy-analysis-of-dominance-in-software-ai/>

12. Dassault Systèmes (2023) 3DEXPERIENCE Virtual Twin Industry Reference.URL: <https://digitaltwininsider.com/2024/06/05/dassault-systemes-leading-european-digital-twin-provision-by-example/>
13. Ukrainian Engineering Journal (2022) Інтелектуальні виробничі комплекси та цифрові системи. URL: https://www.researchgate.net/publication/389803850_Integracia_Ukraini_v_cifrovij_globalnij_prostir
14. ВНТУ (2023) Методи структурної гнучкості виробничих систем. Аналіз структурної і технологічної гнучкості на підприємствах. Ветодологіз вимірювання та проектування гнучкості.URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Mulyar_2022_115.pdf
15. НТУ «ХПІ» (2022) Моделі інтегрованих автоматизованих систем у машинобудуванні. Теоретичні основи інтеграції CAD–CAM–MES у машинобудуванні.
16. НТУ «ХПІ» (2022) Моделі інтегрованих автоматизованих систем у машинобудуванні. URL: <https://www.academia.edu>
17. Прикарпатський НУ (2023) Підходи до проектування кіберфізичних виробничих систем. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://kit.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/70/2023/01/2022_International_Conference_on_Innovative_Solutions_in_Software.pdf
18. IEEE Transactions on Automation Science (2023) AI-Based Scheduling in Flexible Manufacturing. URL: <https://www.ieee-ras.org/about-ras/governance/publication-activities-board/ieee-transactions-on-automation-science-and-engineering-t-ase>
19. CIRP Annals (2022) Collaborative Robotics in Adaptive Manufacturing.URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/cirp-annals/vol/71/issue/1>
20. MIT Press (2023) Foundations of Digital Engineering/URL: <https://mitpress.mit.edu/>

REFERENCES:

1. Wang B. et al. (2023) Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: Comparative Review URL: https://www.researchgate.net/publication/343384802_Smart_Manufacturing_and_Intelligent_Manufacturing_A_Comparative_Review
2. Soori M. et al. (2023) Digital Twin in Smart Manufacturing: Integrative Review. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344423000099>
3. Fu Y. (2022) Digital Twin-Enabled Design-To-Manufacture Systems. URL: <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-022-00760-x>
4. Smart_manufacturing_systems_for_Industry_40_Conceptual_framework_scenarios_and_future_perspectives/URL: <https://www.researchgate.net/publication/322673524>
5. Zhong R.Y. et al. (2022) Flexible Manufacturing and AI-Oriented Systems: Survey. URL: https://www.researchgate.net/publication/360580876_Enabling_flexible_manufacturing_system_FMS_through_the_applications_of_industry_40_technologies
6. Li X. et al. (2023) PLM-Integrated Smart Manufacturing Framework. <https://www.researchgate.net/journal/Sustainability>
7. ISO/IEC 23247 (2022) Digital Twin Framework for Manufacturing.URL: https://www.researchgate.net/publication/378099287_A_Manufacturing_Digital_Twin_Framework
8. Xu X. (2022) Machine Tool Digital Twins and Cyber-Physical Manufacturing.URL: https://www.researchgate.net/publication/376843087_Digital_Twin_of_Cyber-Physical_CNC_for_Smart_Manufacturing
9. European Commission (2023) Digital Industry Strategy and AI for Manufacturing.URL: <https://euobserver.com/eu-and-the-world/ar178848e4>

10. Siemens (2023) Xcelerator White Paper — Digital Engineering and Manufacturing Backbone. URL: https://www.leonardo.com/documents/15646808/29848048/PIJ_2025_N52.pdf?t=1741965054687
11. Autodesk Research (2022) Generative Design and AI-Based Engineering. URL: <https://www.klover.ai/autodesk-ai-strategy-analysis-of-dominance-in-software-ai/>
12. Dassault Systèmes (2023) 3DEXPERIENCE Virtual Twin Industry Reference. URL: <https://digitaltwininsider.com/2024/06/05/dassault-systemes-leading-european-digital-twin-provision-by-example/>
13. Ukrainian Engineering Journal (2022) Intelktualni vyrobnychi kompleksy ta tsyfrovi systemy. URL: https://www.researchgate.net/publication/389803850_Integracia_Ukraini_v_cifrovij_globalnij_prostir
14. VNTU (2023) Metody strukturnoi hnuchkosti vyrobnych system. Analiz strukturnoi i tekhnolohichnoi hnuchkosti na pidpriemstvakh. Vetodolohiz vymyruvannia ta proektuvannia hnuchkosti. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Mulyar_2022_115.pdf
15. NTU «KhPI» (2022) Modeli intehrovanykh avtomatyzovanykh system u mashynobuduvanni. Teoretychni osnovy intehratsii CAD–CAM–MES u mashynobuduvanni.
16. NTU «KhPI» (2022) Modeli intehrovanykh avtomatyzovanykh system u mashynobuduvanni. URL: <https://www.academia.edu>
17. Prykarpatskyi NU (2023) Pidkhody do proektuvannia kiberfizychnykh vyrobnych system. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://kit.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/70/2023/01/2022_International_Conference_on_Innovative_Solutions_in_Software.pdf
18. IEEE Transactions on Automation Science (2023) AI-Based Scheduling in Flexible Manufacturing. URL: <https://www.ieee-ras.org/about-ras/governance/publication-activities-board/ieee-transactions-on-automation-science-and-engineering-t-ase>
19. CIRP Annals (2022) Collaborative Robotics in Adaptive Manufacturing. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/cirp-annals/vol/71/issue/1>
20. MIT Press (2023) Foundations of Digital Engineering/URL: <https://mitpress.mit.edu/>

Стаття надійшла до редакції: 07.09.2025; рецензування: 18.09.2025;

прийнята до публікації 08.10.2025. Автори прочитали і дали згоду рукопису.

The article was submitted on 07.09.2025; revised on 18.09.2025; and accepted for publication on 08.10.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.