

УДК 004.94:004.77:378:62

DOI <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-4.33>**Дуганець В. І.**

заслужений працівник освіти України,
доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук,
професор, завідувач кафедри тракторів, автомобілів та енергетичних засобів,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: duganec.viktor@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3383-5907

Пукас В. Л.

кандидат технічних наук,
доцент кафедри тракторів, автомобілів та енергетичних засобів,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: pukasvital@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0083-7359

Гарасимчук І. Д.

кандидат технічних наук,
доцент кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: igorgarasymchuk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4304-4447

Потапський П. В.

кандидат технічних наук,
доцент кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: p.v.potap@meta.ua
ORCID: 0000-0003-4792-8992

ІНТЕГРАЦІЯ ПРИКЛАДНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТ-РЕЧЕЙ У ПІДГОТОВЦІ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Анотація

Стаття присвячена критичній проблемі історичного розриву між теоретичною підготовкою здобувачів інженерних спеціальностей (що часто обмежується прикладним комп'ютерним моделюванням) та практичною реалізацією (зокрема, проєктуванням повноцінних систем Інтернету речей – IoT). Цей значний диспаритет у навчальному процесі безпосередньо суперечить актуальним вимогам Індустрії 4.0 та необхідності підготовки фахівців, здатних ефективно працювати з кіберфізичними системами (КФС).

Автори обґрунтовують нагальну необхідність парадигмального переходу до КФС-Освіти, орієнтованої на формування наскрізних компетенцій сучасного інженера. Центральним і ключовим елементом цієї нової освітньої концепції виступає ідея цифрового двійника (Digital Twin). Саме цей інструментарій забезпечує безшовну, двосторонню конвергенцію та інтеграцію віртуального і фізичного середовищ, дозволяючи моделювати, контролювати та оптимізувати реальні фізичні процеси в режимі реального часу.

З метою подолання виявленого розриву та забезпечення цілісності інженерної підготовки у статті запропоновано та детально описано оригінальну п'ятифазну модель життєвого циклу інтегрованого проєкту. Ця модель являє собою структурований та послідовний алгоритм роботи, що охоплює всі ключові етапи – від початкової ідеалізації та створення детермінованої математичної або комп'ютерної моделі через симуляційні та валідаційні процеси аж до емпіричної апробації (тестування в реальних умовах) та фізичного впровадження повномасштабної кіберфізичної системи.

Окрему увагу приділено визначенню організаційно-педагогічних умов, необхідних для ефективного впровадження запропонованої п'ятифазної моделі у навчальний процес. Ключовою умовою виступає створення інтегрованого лабораторного комплексу, який має бути оснащений сучасними засобами для роботи з IoT, віртуальною/доповненою реальністю та інструментами для створення та використання цифрових двійників.

Результати проведеного дослідження мають високу методологічну цінність і можуть слугувати теоретичною та практичною основою для реформування інженерних освітніх програм, зокрема для формування необхідних наскрізних професійних компетенцій КФС-інженера, здатного проєктувати, розробляти та експлуатувати складні кіберфізичні системи в умовах глобалізованого цифрового виробництва.

Ключові слова: прикладне комп'ютерне моделювання, Інтернет речей, кібе-фізичні системи, цифровий двійник, інженерна освіта.

Вступ. Стрімкий розвиток концепції Індустрії 4.0 та повсюдне впровадження кіберфізичних систем (КФС) докорінно трансформують інженерну діяльність, вимагаючи від фахівців нового покоління наскрізних, інтегрованих компетенцій. Якщо раніше проєктування систем зводилося до послідовного застосування прикладного комп'ютерного моделювання (ПКМ) для теоретичної оптимізації та подальшої реалізації апаратних рішень (Інтернет речей – IoT), то сучасна парадигма вимагає їхньої ефективної інтеграції. Випускники закладів вищої освіти інженерних спеціальностей повинні вміти не просто створювати цифрову модель чи збирати фізичний прототип, а й забезпечувати їхній постійний взаємозв'язок через механізм Digital Twin (цифровий двійник), забезпечуючи швидко апробацію (валідацію), аналіз похибок та оптимізацію в реальному часі.

Незважаючи на усвідомлення цього освітнього виклику, значна частина освітніх програм усе ще підтримують історичний розрив між курсами симуляційного моделювання та дисциплінами, орієнтованими на апаратне прототипування. Це призводить до підготовки фахівців із фрагментарними знаннями, нездатних ефективно керувати повним життєвим циклом інтегрованого проєкту – від ідеалізації детермінованої моделі до фізичного впровадження КФС. Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності розробки цілісної організаційно-педагогічної моделі, яка дозволить ефективно інтегрувати методології ПКМ та проєктування IoT-систем, формуючи ключові компетенції КФС-інженера.

Теоретична база дослідження є комплексною і охоплює всі ключові аспекти моделі життєвого циклу інтегрованого проєкту.

Базові положення щодо кіберфізичних систем обґрунтовані монографією А. Мельника та співавторів, що розкриває їхню багаторівневу організацію та принципи проєктування. Це створює теоретичну рамку для всієї концепції КФС-освіти. Центральний елемент статті – технологія цифрового двійника (Digital Twin) – детально висвітлюється у працях І. Головатенка і А. Писаренка та В. Щеглова й О. Морозової, які акцентують увагу на методах та технологіях розроблення Digital Twin для гарантоздатних систем. Ці джерела підтверджують наукову необхідність використання Digital Twin як освітнього інструменту.

Розробка першої фази моделі життєвого циклу інтегрованого проєкту (ідеалізація та ПКМ) ґрунтується на працях з комп'ютерного моделювання технологічних процесів (Б. Воронцов та ін.) та математичного моделювання систем (колективна монографія В. Щербаня та ін.). Ці матеріали забезпечують методологічну базу для створення функціональної віртуальної моделі. Критичний етап валідації (порівняння моделі з реальністю) підкріплюється дослідженням Р. Трембовецької та співавторів, які висвітлюють природу похибок та невизначеностей вимірювань. Розуміння цих похибок є життєво необхідним для корекції Digital Twin.

Практичні фази проєктування IoT-систем підтримуються дослідженням О. Мнушки і В. Савченка про апаратно-програмну платформу для прототипування пристроїв Інтернету речей. Завершальний етап циклу, який вимагає розробки просунутих керуючих алгоритмів, спирається на роботу М. Корепанова, присвячену алгоритмам оптимізації, необхідних для автономної роботи КФС.

Актуальність та спрямованість дослідження підкреслюється статтею А. Марамон про пріоритети інженерно-технічної освіти, що підтверджує світовий тренд на формування інтегрованих, міждисциплінарних інженерних компетенцій.

Мета дослідження. Метою статті є теоретичне обґрунтування та розробка цілісної організаційно-педагогічної моделі життєвого циклу інтегрованого проєкту (МЖЦІП), спрямованої на подолання історичного розриву між прикладним комп'ютерним моделюванням та проєктуванням Інтернету речей, що забезпечить формування наскрізних компетенцій КФС-інженера в умовах кіберфізичної освіти.

Для досягнення поставленої мети та вирішення визначених завдань були використані такі методи дослідження, як: теоретичний аналіз наукової та навчально-методичної літератури з питань кіберфізичних систем, цифрового двійника та інженерної педагогіки; систематизація та узагальнення провідного світового досвіду інтеграції ПКМ та IoT; педагогічне моделювання для розробки п'ятифазної моделі життєвого циклу інтегрованого проєкту; системний підхід для визначення організаційно-педагогічних умов впровадження. Матеріалами дослідження слугували концептуальні основи Індустрії 4.0, принципи проєктування Digital Twin та міжнародні вимоги до компетенцій сучасного інженера.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційна інженерна освіта була заснована на двох основних стовпах: фізичне проєктування (механіка, гідравліка, електротехніка) та математичне моделювання [5]. Із появою

комп'ютерних технологій ПКМ стало потужним інструментом для ідеалізації та симуляції процесів. Однак цей підхід часто оперує детермінованими та статичними моделями, які не враховують нелінійності та стохастичності реального середовища (зміна погоди, властивостей ґрунту, непередбачувані зовнішні впливи).

КФС-парадигма вимагає створення систем, які можуть автономно адаптуватися до змін. Це можливо лише тоді, коли віртуальна модель постійно «спілкується» з реальним світом через IoT-сенсори. Отже, головна проблема сучасної освіти полягає у недостатній інтеграції цих двох світів – віртуального (ПКМ) та фізичного (IoT) [1].

Цифровий двійник (Digital Twin) – це віртуальна копія фізичного об'єкта чи процесу, яка динамічно оновлюється за допомогою даних у реальному часі. Це комплексна віртуальна модель фізичного об'єкта, продукту чи системи, ключовою особливістю якої є двосторонній зв'язок із реальним середовищем за допомогою актуальних даних. Ця технологія, що дозволяє створювати віртуальні клони, є незамінним інструментом для практичної перевірки технологій та гіпотез, оптимізації роботи та прогнозування змін у режимі реального часу без ризику впливу на фізичний аналог. Сфера її застосування є універсальною, охоплюючи моделювання об'єктів від реактивних двигунів і вітрових електростанцій до масштабної логістичної інфраструктури міст. Функціонал Digital Twin реалізується через інтеграцію ПКМ, Інтернету речей (IoT), інструментів штучного інтелекту (ШІ), аналітики даних та технологій віртуальної реальності. У контексті інженерної освіти Digital Twin виступає як критично важливий засіб для апробації проєктних рішень [3].

В освітньому процесі Digital Twin стає ключовою інтеграційною ланкою:

- 1) здобувач освіти спочатку створює віртуальну копію (ПКМ);
- 2) здобувач «підключає» до цієї копії IoT-систему (сенсори), яка подає реальні дані;
- 3) модель автоматично калібрується і починає відображати реальний стан об'єкта.

Таким чином, Digital Twin перетворює ПКМ із засобу прогнозування на інструмент динамічного керування та адаптації [9].

Слід зазначити, що підготовка інженера для роботи з КФС вимагає переходу від класичного набору знань до формування наскрізних інтегрованих компетенцій. Традиційна освіта фокусується зазвичай на вузькій спеціалізації (наприклад, суто моделюванні або суто програмуванні мікроконтролерів). Натомість КФС-інженер має володіти трьома основними групами компетенцій, що забезпечують успішне управління моделлю життєвого циклу інтегрованого проєкту (МЖЦП) та відповідають вимогам КФС-освіти:

1) Компетенції моделювання та аналізу, які включають здатність не лише розробляти математичні та комп'ютерні моделі фізичних процесів, але й розуміти їхню багатомасштабність та мультифізичність. Це передбачає вміння проводити складні симуляції для прогнозного аналізу, а також критично верифікувати (перевіряти відповідність моделі математичним рівнянням) та валідувати (підтверджувати відповідність моделі реальності) отримані результати. На цьому етапі інженер має використовувати дані для аналізу чутливості та формування технічних вимог до фізичної частини системи.

2) Компетенції апаратно-програмної інтеграції (IoT) – це комплекс навичок, що виходить за межі базового програмування мікроконтролерів. Він охоплює проєктування та збирання надійних фізичних систем, роботу з різноманітними сенсорами та актуаторами, навички вбудованого програмування (embedded programming), а також глибоке розуміння мережевих та безпекових протоколів IoT (наприклад, MQTT, CoAP). Критично важливою є здатність забезпечувати надійну та безпечну передачу даних у реальному часі до центральної платформи чи хмарного середовища, що є основою для подальшої конвергенції.

3) Компетенції системної конвергенції (Digital Twin) – синтетична компетентність, що об'єднує дві попередні. Вона включає вміння створювати цикл зворотного зв'язку, інтегруючи віртуальну модель і фізичний прототип, використовуючи принципи Digital Twin. Сюди також входить здатність застосовувати методи штучного інтелекту, зокрема машинне навчання, для обробки великих обсягів даних з IoT-систем. Це дозволяє здійснювати проактивну діагностику, прогнозне обслуговування та, що найважливіше, забезпечувати автономну оптимізацію системи та прийняття рішень на основі даних, отриманих із фізичного середовища [6].

Таким чином, ключовою вимогою стає не лише володіння окремими інструментами, а й розуміння та реалізація циклічного взаємозв'язку між ними, що вбудовується в основу запропонованої нами моделі життєвого циклу інтегрованого проєкту (МЖЦП).

Для системної реалізації конвергентного підходу пропонується п'ятифазна ітераційна МЖЦП, що базується на принципах спіральної розробки та Project-Based Learning (PBL):

– Фаза 1. Ідеалізація та детерміноване моделювання (ПКМ). Ця фаза є фундаментальною для всього проєкту. Її мета полягає у встановленні базових інженерних параметрів об'єкта та створенні його первинного цифрового двійника (Digital Twin). На цьому етапі відбувається аналіз фізичного процесу, який необхідно контролювати (наприклад, динаміка теплообміну в промисловому сховищі). Діяльність включає розробку математичної моделі (наприклад, із застосуванням середовища Simulink), а також проведення CAE-аналізу (Computer-Aided Engineering) конструкції, зокрема із використанням програмних комплексів типу ANSYS, для оцінки фізичних навантажень та поведінки системи в ідеальних умовах. Результатом цієї фази є прогнозована функціональна модель системи, яка дозволяє симулювати її поведінку та, що критично важливо, визначити оптимальні контрольні точки для подальшого розміщення сенсорів і збору реальних даних. Це забезпечує основу для подальшої фізичної реалізації [10].

– Фаза 2. Апаратно-програмне прототипування (IoT) спрямоване на фізичну реалізацію. Мета цього етапу – зібрати функціональний IoT-прототип, що відповідає вимогам, визначеним у фазі 1, та здатний здійснювати збір емпіричних даних з попередньо визначених контрольних точок. Діяльність охоплює вибір необхідного мікроконтролера, точне налаштування та калібрування сенсорів (наприклад, датчиків температури чи вологості) для забезпечення достовірності вимірювань. Після цього відбувається програмування вбудованого програмного забезпечення для ефективного зчитування даних та забезпечення їхньої надійної передачі на хмарну платформу. Результатом фази 2 є працююча мережа сенсорів, яка успішно збирає та передає «сирі» емпіричні дані, що є критично важливим матеріалом для подальшої валідації моделі [7].

– Фаза 3. Емпірична валідація та аналіз похибок (інтеграція) є ключовою для верифікації адекватності розробленої ПКМ-моделі та встановлення коректного зв'язку між віртуальним і фізичним світами. Мета цієї фази – верифікація адекватності ПКМ-моделі шляхом порівняння її прогнозів із реально отриманими даними. Діяльність починається з експорту масивів даних (часових рядів) із хмарної IoT-платформи, де вони були накопичені у фазі 2, у середовище ПКМ (наприклад, MATLAB, Python чи інше аналітичне програмне забезпечення). Далі здійснюється безпосереднє порівняння результатів симуляції (прогноз, отриманий у фазі 1) та реальних вимірювань (емпірика). На основі цього аналізу інженер визначає коефіцієнти похибки, виявляючи невідповідності між ідеалізованим і реальним процесами. Ключове навчання для здобувача освіти на цьому етапі полягає в усвідомленні того, як спрощення та ідеалізація, закладені в початкову модель (фаза 1), неминуче призводять до похибок у реальному світі, що стимулює необхідність подальшої оптимізації моделі [8].

– Фаза 4. Оптимізація моделі та алгоритму (конвергенція) є етапом двосторонньої корекції, за якої досягається справжнє злиття віртуального та фізичного світів. Мета цієї фази – здійснити корекцію Digital Twin на основі емпіричних даних, а також розробити адаптивний алгоритм керування системою. Діяльність починається з використання результатів аналізу похибок (фаза 3), на основі яких здобувач освіти коригує параметри своєї ПКМ-моделі (наприклад, уточнює коефіцієнти тепловтрат, враховує вплив навколишнього середовища, який був ідеалізований). Ця оновлена модель стає точнішим Digital Twin. Паралельно відбувається розробка просунутого алгоритму керування, який тепер використовує як скориговану, більш точну ПКМ-модель, так і реальні, очищені IoT-дані. Результатом фази 4 є оновлений Digital Twin (який максимально близько відповідає реальному об'єкту) та адаптивний алгоритм керування, готовий до фізичного завантаження [4].

– Фаза 5. Фізичне впровадження та тестування (реалізація КФС) є завершальним етапом циклу, на якому інтегрована система переходить до автономної роботи в реальному середовищі. Мета цієї фази – здійснити завантаження оптимізованого алгоритму в IoT-систему та провести її довготривале тестування для підтвердження стійкості та ефективності. Діяльність охоплює перенесення фінального, скоригованого алгоритму керування, розробленого у фазі 4, безпосередньо в мікроконтролер IoT-прототипу для забезпечення автономного керування актуаторами. Після завантаження здійснюється довготривалий моніторинг ефективності системи в динамічних умовах. Результатом фази 5 є працююча кіберфізична система, яка демонструє здатність до адаптації до змінних зовнішніх умов та автоматичної оптимізації процесів, що підтверджує сформованість усіх наскрізних компетенцій інженера [2].

Успіх МЖЦІП залежить від радикальної зміни освітнього середовища.

Лабораторії у сучасному університеті мають функціонувати як єдиний простір, де фізично інтегровані:

– ПКМ-сектор – потужні робочі станції з ліцензійним програмним забезпеченням (MATLAB, Simulink, ANSYS тощо).

– IoT-сектор – паяльні станції, 3D-принтери для корпусів, різноманітні сенсорні набори, платформи для швидкого прототипування.

– Фізичні стенди (Smart-полігони) – моделі реальних об'єктів (мінітеплиці, стенди для моделювання якості води), що дозволяють здобувачам освіти проводити реальні довготривалі експерименти та збирати Big Data.

До того ж необхідна зміна ролі науково-педагогічного працівника з «транслятора знань» на «ментора інтеграції». Проєктами мають керувати команди викладачів, які забезпечують експертизу на стику дисциплін:

– інженер-модельєр (контролює фази 1, 3, 4 – точність ПКМ-розрахунків);

– IT-розробник (контролює фази 2, 4, 5 – якість коду, мережеві комунікації, хмарна архітектура). Це вимагає системного підходу до підвищення кваліфікації викладацького складу.

Традиційні екзамени (заліки) слід замінити комплексною оцінкою, що включає:

1) аналітичний звіт (детальний опис ПКМ-моделі та математичного обґрунтування – фаза 1);

2) звіт про валідацію (документація порівняння даних та розрахунок коефіцієнтів корекції – фаза 3);

3) технічна реалізація (якість коду, надійність збору даних та функціональність IoT-прототипу – фази 2, 5);

4) захист проєкту (презентація адаптивного алгоритму та його ефективності, що демонструє системне бачення проєкту).

Висновки. Проведене дослідження було спрямоване на теоретичне обґрунтування та створення цілісної моделі, необхідної для подолання історичного розриву між прикладним комп'ютерним моделюванням та апаратно-програмним проєктуванням Інтернету речей (IoT) в інженерній освіті.

Насамперед було концептуалізовано необхідність переходу до кіберфізичної освіти, де центральне місце посідає технологія цифрового двійника (Digital Twin). Обґрунтовано, що Digital Twin є не просто інструментом

симуляції, а фундаментальною основою для формування наскрізних інтегрованих компетенцій КФС-інженера, який ефективно поєднує навички моделювання, IoT-інтеграції та системної конвергенції.

Ключовим результатом дослідження стала розроблена та детально описана п'ятифазна модель життєвого циклу інтегрованого проекту, яка пропонує цілісний методичний каркас для підготовки фахівців, що охоплює увесь проектний цикл, реалізуючи наскрізний процес, заснований на циклі зворотного зв'язку «віртуальне → фізичне → корекція віртуального». Це досягається шляхом послідовного проходження фаз від ідеалізації (створення початкового Digital Twin та прогнозування) до валідації (порівняння прогнозу з емпіричними даними та аналіз помилок) і, нарешті, до оптимізації (корекції моделі та розробки адаптивного алгоритму).

Така модель життєвого циклу інтегрованого проекту є методологічною основою для набуття інтегрованої компетенції в управлінні складними кіберфізичними системами. Подальша дослідницька робота буде зосереджена на деталізації організаційно-педагогічних умов, необхідних для успішного впровадження моделі життєвого циклу інтегрованого проекту в освітній процес, включаючи розробку структури інтегрованого лабораторного комплексу та методичного забезпечення.

Список використаних джерел

1. Воронцов Б.С., Бецо Ю.М., Мельник О.О. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 186 с.
2. Головатенко І.А., Писаренко А.В. Методи моделювання кібер-фізичних систем. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». 2021. № 2(39). С. 74–83.
3. Деркач М. Цифрові двійники: що це за технологія і як вона допоможе відновити Україну. *Pay Space Magazine*. URL: <https://psm7.com/uk/technology/cifrovye-dvoyniki-hto-eto-za-technologiya-i-kak-ona-pomozhet-vosstanovit-ukrainu-analitika.html> (дата звернення: 19.09.2025).
4. Корепанов М.В. Алгоритми оптимізації: порівняння і використання в інформаційних системах. *Зв'язок*. 2025. № 4. С. 99–107. URL: <https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/article/view/2902> (дата звернення: 22.09.2025).
5. Марамон А. Пріоритети інженерно-технічної освіти. *Освіта.UA*. URL: <https://osvita.ua/blogs/88924/> (дата звернення: 14.09.2025).
6. Мельник А.О., Мельник В.А., Глухов В.С., Сало А.М. Кіберфізичні системи: багаторівнева організація та проектування. Київ : Магнолія, 2023. 238 с.
7. Мнушка О.В., Савченко В.М. Апаратно-програмна платформа для прототипування пристроїв Інтернету речей. *Проблеми інформатики та моделювання* : тези XX міжнародної науково-технічної конференції, Харків : НТУ «ХПІ», 2020. С. 55.
8. Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В., Матвієнко Д.Г. Помилки та невизначеності вимірювань. Черкаси : ЧДТУ, 2024. 254 с.
9. Щеглов В.Р., Морозова О.І. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального Інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. № 4. С. 127–137. URL: https://www.researchgate.net/publication/366806182_METODI_TA_TEHNOLOGII_ROZROBLENNIA_CIFROVIN_DVIJNIKIV_DLA_GARANTOZDATNIH_SISTEM_INDUSTRIALNOGO_INTERNETU_RECEJ (дата звернення: 17.09.2025).
10. Щербань В.Ю., Колиско О.З., Щербань Ю.Ю., Мельник Г.В., Колиско М.І., Кириченко А.М. Математичне моделювання систем і технологічних процесів : колективна монографія. Київ : ТОВ «Фастбінд Україна», 2023. 939 с.

Duhanets V. I.

*Honored Worker of Education,
Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences,
Professor, Head of the Department of Tractors, Automobiles, and Power Equipment,
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: duganec.viktor@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3383-5907*

Pukas V. L.

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Tractors, Automobiles
and Power Equipment,
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: pukasvital@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0083-7359*

Harasymchuk I. D.

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Electrical Engineering, Electromechanics, and Electrical Technologies,
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: igorgarasymchuk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4304-4447*

Potapyskyi P. V.

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Electrical Engineering,
Electromechanics and Electrotechnologies
Higher Educational Institution "Podillia State University"
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
E-mail: p.v.potap@meta.ua
ORCID: 0000-0003-4792-8992*

INTEGRATION OF APPLIED COMPUTER MODELING AND INTERNET OF THINGS SYSTEMS DESIGN IN TRAINING ENGINEERING STUDENTS

Abstract

The article addresses the critical issue of the historical gap between the theoretical training of engineering students (often limited to applied computer modeling) and its practical implementation (specifically, the design of full-fledged Internet of Things – IoT systems). This significant disparity in the educational process directly contradicts the current requirements of Industry 4.0 and the necessity of preparing specialists capable of working effectively with Cyber-Physical Systems (CPS).

The authors substantiate the urgent need for a paradigmatic transition to CPS-Education, focused on developing the cross-cutting competencies of a modern engineer. The central and key element of this new educational concept is the idea of the Digital Twin. It is this toolset that ensures a seamless, bidirectional convergence and integration of virtual and physical environments, allowing for the real-time modeling, monitoring, and optimization of actual physical processes.

To bridge the identified gap and ensure the integrity of engineering training, the article proposes and details an original five-phase model of the integrated project lifecycle. This model represents a structured and sequential algorithm of work that covers all key stages – from the initial idealization and creation of a deterministic mathematical or computer model (Phase 1), through simulation and validation processes, up to empirical testing (real-world environment testing) and the physical implementation of the full-scale Cyber-Physical System (Phase 5).

Special attention is paid to defining the organizational and pedagogical conditions necessary for the effective implementation of the proposed five-phase model into the educational process. A key condition is the creation of an integrated laboratory complex, which must be equipped with modern tools for working with IoT, virtual/augmented reality, and instruments for creating and utilizing Digital Twins.

The results of the study possess high methodological value and can serve as a theoretical and practical basis for the reform of engineering educational programs, specifically for the development of the necessary cross-cutting professional competencies of a CPS-engineer, capable of designing, developing, and operating complex cyber-physical systems in the context of globalized digital manufacturing.

Key words: *Applied Computer Modeling, Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS), Digital Twin, Engineering Education.*

References

1. Vorontsov, B.S., Betsko, Yu.M. & Melnyk, O.O. (2023). *Kompiuterne modeliuвання tekhnolohichnykh protsesiv* [Computer Modeling of Technological Processes]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 186 p. [in Ukrainian].
2. Holovatenko, I.A. & Pysarenko, A.V. (2021). *Metody modeliuвання kiberfizychnykh system* [Methods for Modeling Cyber-Physical Systems]. Interdepartmental Scientific and Technical Collection “*Adaptive Automatic Control Systems*”, 2(39), 74–83 [in Ukrainian].
3. Derkach, M. (2023). Tsyfrovi dviinyky: shcho tse za tekhnolohiia i yak vona dopomozhe vidnovyty Ukrainu [Digital Twins: What is this technology and how will it help restore Ukraine?]. *Pay Space Magazine*. Retrieved from: <https://psm7.com/uk/technology/cifrovye-dvojniki-chto-eto-za-tekhnologiya-i-kak-ona-pomozhet-vosstanovit-ukrainu-analitika.html>. [in Ukrainian].
4. Korepanov, M.V. (2025). Alhorytmy optymizatsii: porivniannia i vykorystannia v informatsiinykh systemakh [Optimization Algorithms: Comparison and Application in Information Systems]. *Zvyazok*, 4, 99–107 [in Ukrainian].
5. Maramon, A. (2023). Priorytety inzhenerno-tekhnichnoi osvity [Priorities of Engineering and Technical Education]. *Osvita.UA*. Retrieved from: <https://osvita.ua/blogs/88924/>. [in Ukrainian].
6. Melnyk, A.O., Melnyk, V.A., Hlukhov, V.S. & Salo A.M. (2023). *Kiberfizychni systemy: bahatorivneva orhanizatsiia ta proektuvannia* [Cyber-Physical Systems: Multi-Level Organization and Design]. Kyiv: Magnolia, 2023. 238 p. [in Ukrainian].
7. Mnushka, O.V. & Savchenko, V.M. (2020). Aparatno-prohramna platforma dlia prototypuvannia prystroiv Internetu rechei [Hardware and Software Platform for Prototyping Internet of Things Devices]. *Problems of Informatics and Modeling: Abstracts of the Twentieth International Scientific and Technical Conference*. Kharkiv: NTU “KhPI”. P. 55. [in Ukrainian].
8. Trembovetska, R.V., Halchenko, V.Ia., Tychkov, V.V. & Matviienko, D.H. (2024). *Pokhybky ta nevyznachenosti vymiriuvan* [Errors and Uncertainties in Measurements]. Cherkasy: ChDSTU, 254 p. [in Ukrainian].
9. Shcheglov, V.R. & Morozova, O.I. (2022). *Metody ta tekhnolohii rozroblennia tsyfrovyykh dviinykiv dlia harantozdatnykh system industrialnogo internetu rechei* [Methods and Technologies for Developing Digital Twins for Fault-Tolerant Industrial Internet of Things Systems]. *Control, Navigation and Communication Systems*, 4, 127–137. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/366806182_METODI_TA_TEHNOLOGII_ROZROBLENNIA_CIFROVIH_DVIJNIKIV_DLA_GARANTOZDATNIH_SISTEM_INDUSTRIALNOGO_INTERNETU_RECEJ [in Ukrainian].
10. Shcherban, V.Yu., Kolysko, O.Z., Shcherban, Yu.Yu., Melnyk, H.V., Kolysko, M.I. & Kyrychenko, A.M. (2023). *Matematychni modeliuвання system i tekhnolohichnykh protsesiv: kolektyvna monohrafiia* [Mathematical Modeling of Systems and Technological Processes: collective monograph]. Kyiv: Fastbind Ukraine LLC, 939 p. [in Ukrainian].

Отримано: 03.10.2025

Рекомендовано: 05.11.2025

Опубліковано: 16.12.2025