

Національна академія наук України
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ШЕВЧЕНКО СТАНІСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

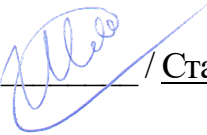
УДК 620:658.6:(004.77+004.62):(004.8+512)

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ
СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ 3D-МОДЕЛЕЙ З НАВЧАННЯ СПЕЦІАЛІСТІВ
З РЕМОНТУ НАСОСІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ

122 – Комп’ютерні науки
12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 / Станіслав ШЕВЧЕНКО

Науковий керівник:

Винничук Степан Дмитрович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Шевченко С.С. Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп’ютерні науки. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ, 2026.

Створення комп’ютерних навчальних мультимедійних засобів для підготовки фахівців з ремонту насосів атомних електричних станцій передбачає розробку сценаріїв, їх верифікацію та візуалізацію. При виконанні ремонтних робіт приймають участь ряд спеціалістів, тому сценарії є багатокористувацькими, де кожен зі спеціалістів виконує певну визначену йому роль. Для створення сценаріїв на даний час існує ряд систем опису діяльності з урахуванням ролей, наприклад, BPMN 2.0, для яких проблемними є вирішення завдань верифікації. Сценарій у вигляді мережі Петрі – це математична модель, на аналізі якої можна вирішити завдання верифікації, проте в них не передбачено врахування ролей учасників сценарію. При візуалізації процесів виконання сценарію з використанням 3D-моделей насосного обладнання важливо реалізувати коректне з’єднання елементів насоса, врахувати ймовірність візуального перевантаження користувача, а також знизити вплив мережеских затримок на процес спільної взаємодії.

Тому актуальним є завдання з розробки інформаційної технології створення сценаріїв, їх верифікації та візуалізації при навчанні спеціалістів з ремонту насосного обладнання АЕС на основі представлення сценарію як мережі, заснованої на ідеї мереж Петрі із врахуванням ролей учасників

сценарію, що дозволяє вирішувати завдання верифікації сценаріїв, а для уникнення візуального перевантаження при візуалізації дозволяє обмежувати обсяг інформації на сцені.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та теоретичному обґрунтуванні нових моделей і методів:

1. *Дістала подальшого розвитку* технологія створення інтерактивних навчальних сценаріїв, що включає:

- *запропоновану* модель сценарію як мережі, заснованої на апараті ієрархічних мереж Петрі, де можливим є послідовне та паралельне виконання дій, послідовність яких визначається на основі функціональних обов'язків (ролей) учасників (модель рольової взаємодії у віртуальному середовищі (MPB)). На відміну від класичних мереж Петрі модель пов'язує дискретні стани 3D-моделей з цілеспрямованими діями конкретних ролей, сформованими за принципом передумова → наслідок. На відміну від методів побудови сценаріїв (наприклад, стандарту BPMN 2.0), забезпечується автоматична верифікація сценарію, у тому числі оцінка наявності тупикових ситуацій та взаємних блокувань;
- *вперше запропоновану* інформаційну модель віртуальних навчальних 3D-моделей, представлену кортежем, що включає дані про геометрію, характерні властивості, кінематичні обмеження та функції реакцій. У ній, на відміну від традиційних архітектур 3D-рушіїв, розширено можливості об'єктно-орієнтованого наслідування на архітектуру ієрархічних графів 3D-моделей та інтегровано механізм фіксації залежностей, що усуває ризик деструктивного каскадного ефекту та забезпечує ізоляцію дочірніх компонентів від несанкціонованих або критичних змін у батьківських шаблонах. Розроблено механізм ієрархічного блокування, що дозволяє встановлювати захист від змін на різних рівнях вкладеності: від окремої властивості до 3D-моделі

цілком разом із її дочірніми елементами – що гарантує детермінованість логіки під час виконання (Runtime) сценарію.

2. На основі аналізу алгоритмічних зв'язків між геометрією та логікою сценарію *запропоновано* метод автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, які не задіяні у конкретному сценарії, із залишенням їх зовнішньої оболонки, що, на відміну від класичних алгоритмів сліпої геометричної децимації, суттєво знижує навантаження на систему візуалізації без втрати важливої для навчання інформації.

3. *Вперше запропоновано* метод управління обсягом інформації на сцені для забезпечення прийняттого когнітивного навантаження на користувача, що ґрунтується на теорії когнітивного навантаження (Cognitive Load Theory) і дозволяє утримувати обсяг інформації в межах пропускної здатності робочої пам'яті користувача відповідно до заданого (інструктором або учнем) рівня складності симуляції. Метод включає:

- проактивне сповіщення інструктора про можливе когнітивне перевантаження (кількість одночасно доступних активних об'єктів та дій перевищує встановлену норму) при створенні сценарію;
- візуальне приглушення об'єктів, не задіяних у поточних переходах при виконанні сценарію, яка забезпечує динамічне зниження впливу інформації на сцені, що знаходиться в полі зору користувача;
- автоматичне конвертування частини дій, визначених інструктором, у автоматичні або/та мовчазні τ -переходи при виконанні сценарію (що дозволяє автоматизувати виконання етапів, які не є критичними для обраного рівня складності).

4. *Вперше розроблено* аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів для розподіленої мережевої синхронізації навчальних комплексів. Обґрунтовано, що на відміну від класичних алгоритмів (стандарту DIS IEEE 1278.1), які спираються на поліноміальну екстраполяцію (Dead Reckoning) і зазнають інтенсивного кумулятивного

зростання помилок при високочастотних осциляціях (вібраціях), запропонований метод базується на подієвій трансляції спектральних параметрів (частоти, амплітуди, мітки часу), що робить обсяг мережевого трафіку інваріантним до частоти коливань об'єкта. А використання глобальної часової мітки забезпечує збереження фазової узгодженості в умовах флуктуацій мережевої затримки (джиттеру), гарантуючи синхронне сприйняття високочастотних динамічних процесів та аварійних режимів усіма учасниками. Водночас делегування обчислень на рівень вершинних шейдерів графічного процесора забезпечує візуально-діагностичну еквівалентність відображення без залучення важких систем інженерного моделювання (CAE).

Практичним значенням роботи є створення програмно-алгоритмічного забезпечення та розробка прототипу у вигляді функціональних модулів інформаційної технології створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій. Прототип включає візуальний редактор сценаріїв, що дозволить експертам предметної області створювати навчальні сценарії для їх подальшого розгортання у хмарному середовищі або як автономних локальних симуляторів без залучення програмістів. Застосування методу автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів на практиці дозволяє забезпечити стабільну візуалізацію промислового обладнання у веб-браузерах та алгоритмічно підвищує захист пропрієтарних креслень виробників, знижуючи можливості несанкціонованого копіювання конструкцій обладнання (реверс-інжинірингу). Апробація прототипу на тестових групах підтвердила його працездатність, алгоритмічну стійкість. Експериментальні тестування мережевої архітектури зафіксували суттєве зменшення обсягу переданих даних в умовах імітації деградованих каналів зв'язку.

Основний зміст дисертаційної роботи за розділами:

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також наведено дані про апробацію та публікації здобувача.

У *Розділі 1* проведено критичний аналіз сучасного стану, методів і засобів підготовки фахівців з ремонту насосів атомних станцій. Виявлено технологічні бар'єри, які стримують створення навчальних матеріалів для підготовки ремонтного персоналу АЕС, пов'язані з надлишковою деталізацією інженерних даних, складністю розробки сценаріїв та обмеженнями мережевої синхронізації. Обґрунтовано доцільність застосування No-Code підходу для залучення фахівців галузі без навичок програмування, архітектури клієнтського рендерингу у контексті екологічних обчислень, а також теорії когнітивного навантаження для адаптації структури та візуального представлення сценаріїв до обраного рівня складності.

У *Розділі 2* розроблено математичні моделі та методи побудови інтерактивних багатокористувацьких сценаріїв з використанням 3D-моделей насосного обладнання. Запропоновано інформаційну модель віртуальних навчальних об'єктів за парадигмою «Шаблон-Екземпляр» із механізмами фіксації залежностей й ієрархічного блокування. Створено модель рольової взаємодії (MPV) на базі ієрархічних мереж Петрі для опису послідовно-паралельних дій учасників, автоматичного аналізу простору станів і виявлення тупикових ситуацій та взаємних блокувань (deadlocks). Розроблено метод автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, які не задіяні у конкретному сценарії, метод управління когнітивним навантаженням для утримання обсягу інформації в межах пропускну здатності робочої пам'яті відповідно до заданого рівня складності та аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів.

У Розділі 3 викладено алгоритмічне та програмне забезпечення розробленої системи. Описано мікросервісну клієнт-серверну архітектуру програмного комплексу, алгоритми підготовки та оптимізації інженерних 3D-даних, функціональні модулі візуального створення сценаріїв, статичного аналізу й адаптивного клієнтського рушія виконання (Runtime Engine), а також алгоритмічне забезпечення мережевої синхронізації у розподіленому середовищі.

У Розділі 4 наведено результати практичної реалізації розробленої інформаційної технології у вигляді створення навчальних сценаріїв для насосного обладнання АЕС. Представлено результати експериментальних досліджень ефективності алгоритмів мережевої синхронізації, оцінки екологічної та інфраструктурної ефективності рішень, а також оцінки прискорення процесу розробки навчального контенту. Наведено результати апробації прототипу, що підтвердили статистичну значущість покращення показників формування практичних навичок у слухачів.

У Висновках узагальнено основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження, підтверджено виконання всіх поставлених завдань та окреслено перспективи подальшого використання технології.

Ключові слова: інформаційна система, локальний симулятор, мобільний веб-застосунок, обробка та зберігання даних, 3D-моделі, 3D-моделювання, 3D-середовище, підготовка персоналу, інтерактивна навчальна програма, візуалізація даних, мережі Петрі, мережева синхронізація, простір станів, мікросервісна архітектура, паралельне моделювання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Shevchenko T., Shams Esfandabadi Z., Ranjbari M., Saidani M., Mesa J., **Shevchenko S.** et al. Metrics in the circular economy: An inclusive research landscape of the thematic trends and future research agenda. *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 165. 112182. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112182. (Scopus, Q1)

Внесок Шевченка Станіслава Сергійовича: брав участь у розробці методології дослідження та обґрунтуванні впливу цифрових інструментів на показники ресурсоощадності та екологічної ефективності.

2. **Shevchenko S.**, Shevchenko S. Increasing the Operational Safety of NPP Pumping Equipment by Using Interactive Automated Remote Educational and Training Systems. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. Vol. 1(101). P. 19–27. DOI: 10.32918/nrs.2024.1(101).02. (Scopus, Q3)

Внесок Шевченка Станіслава Сергійовича: розроблено архітектуру інтерактивної системи дистанційного навчання для персоналу АЕС та запропоновано методику візуалізації насосного обладнання.

3. **Шевченко С. С.** Комплексний підхід та модель ролевої взаємодії при проектуванні кооперативних сценаріїв в інтерактивних навчально-тренувальних системах. *Електронне моделювання*. 2025. Т. 47, № 5. С. 75–86. DOI: 10.15407/emodel.47.05.075. (Фахове видання, категорія «Б»)
4. **Шевченко С. С.** Алгоритмічне забезпечення верифікації та виконання кооперативних сценаріїв у розподілених тренажерних системах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2025. № 2

(10). С. 142–149. DOI: 10.36994/2788-5518-2025-02-10-18. (*Фахове видання, категорія «Б»*)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. **Shevchenko S. S.** Creation of interactive automated educational and training systems. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023)*: тези 23-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 2023 р.). Харків: НТУ "ХПІ", 2023. С. 102–104.
2. **Шевченко С. С.** Інтерактивні автоматизовані дистанційні навчально-тренувальні системи як важлива ланка у резильєнтності критичної інфраструктури. *Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 21 червня 2023 р.). Київ, 2023. С. 102–103.
3. **Шевченко С. С.** Вибір технологій для створення інтерактивних автоматизованих дистанційних навчально-тренувальних систем. *Технології створення і використання засобів підготовки персоналу на об'єктах критичної інфраструктури – 2023*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 8 листопада 2023 р.). Київ, 2023. С. 32–34.
4. **Шевченко С. С.** Підвищення кваліфікації персоналу як засіб покращення безпеки енергетики у цифрову епоху. *Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації*: матеріали V наук.-практ. конф. (м. Київ, 22 листопада 2023 р.). Київ, 2023. С. 117–119.
5. **Шевченко С. С.** Підвищення ефективності використання діагностичної інформації шляхом втілення інтерактивної системи навчання персоналу АЕС. *Технічна діагностика обладнання АЕС*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 6 грудня 2023 р.). Київ, 2023. С. 55–56.
6. **Шевченко С. С.** Питання безпеки контенту та вихідних матеріалів у інтерактивних навчальних системах. *XLII науково-технічна*

конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 15 травня 2024 р.). Київ, 2024. С. 52–53.

7. **Шевченко С. С.** Інтерактивні автоматизовані дистанційні навчально-тренувальні системи як інструмент покращення безпеки енергетики у цифрову епоху. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику*: матеріали VI міжнар. конф. (м. Київ, 27 вересня 2024 р.). Київ, 2024. С. 222–224.
8. **Шевченко С. С., Винничук С. Д.** Роль автоматизованих навчальних платформ у забезпеченні стійкості динамічних систем до зовнішніх змін. *Резильєнтність динамічних систем*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 27 грудня 2024 р.). Київ, 2024. С. 128–129.

Внесок Шевченка Станіслава Сергійовича: обґрунтовано роль автоматизованих платформ у забезпеченні резильєнтності динамічних систем.

9. **Шевченко С. С.** Синхронізоване кооперативне навчання як інструмент підвищення ефективності командної роботи в енергетиці. *XLIII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 14 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 71–73.*
10. **Шевченко С. С.** Моделювання сценаріїв кібератак в інтерактивних 3D-середовищах як інструмент підвищення кіберстійкості персоналу енергетичних підприємств. *Кібербезпека енергетики*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 28 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 55–56.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Пат. 149786 Україна, МПК (2021.01) G09B 19/00. Інтерактивна автоматизована дистанційна навчально-тренувальна система / **С. С.**

Шевченко; заявник та патентовласник С. С. Шевченко. – № и 2021
05876; заявл. 19.10.2021; опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48.

ABSTRACT

Shevchenko S. S. Information Technology for Creating Interactive Scenarios Based on 3D Models for Training Specialists in the Repair of Nuclear Power Plant Pumps. – Qualifying scientific work not been published.

The thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 – Computer Science. – G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The creation of computer-based multimedia educational tools for training nuclear power plant pump repair specialists involves the development, verification, and visualization of scenarios. Since a number of specialists participate in the execution of repair works, the scenarios are multi-user, where each specialist performs a specific assigned role. Currently, there are various role-based activity description systems available for scenario creation, such as BPMN 2.0; however, they face significant challenges in solving verification tasks. A scenario in the form of a Petri net is a mathematical model whose analysis allows solving verification tasks, but traditional Petri nets do not inherently provide for the inclusion of scenario participants' roles. When visualizing scenario execution processes using 3D models of pumping equipment, it is important to implement the correct connection of pump elements, account for the probability of user visual overload, and reduce the impact of network latencies on the collaborative interaction process.

Therefore, an urgent task is the development of an information technology for creating, verifying, and visualizing scenarios for training specialists in the repair of NPP pumping equipment. This technology is based on representing the scenario as a network founded on the concept of Petri nets incorporating participant roles, which enables solving scenario verification tasks and allows

limiting the amount of information in the scene to avoid visual overload during visualization.

The scientific novelty of the work lies in the development and theoretical substantiation of new models and methods:

1. The technology for creating interactive training scenarios *has been further developed*, which includes:

- *the proposed* scenario model as a network based on the apparatus of hierarchical Petri nets, where sequential and parallel execution of actions is possible, with the sequence determined by the functional duties (roles) of the participants (Role-Based Interaction Model in a virtual environment, RBIM). Unlike classical Petri nets, the model links the discrete states of 3D models to goal-oriented actions of specific roles, structured according to the precondition $\rightarrow$ postcondition principle. Unlike existing scenario construction methods (e.g., the BPMN 2.0 standard), this model provides the automatic scenario verification, including the detection of dead-end situations and mutual blockings;
- *proposed for the first time* an information model of virtual educational 3D models, represented by a tuple that includes data on geometry, specific properties, kinematic constraints, and reaction functions. Within this model, unlike traditional 3D engine architectures, the capabilities of object-oriented inheritance are extended to the architecture of hierarchical 3D model graphs, and a dependency pinning mechanism is integrated, which eliminates the risk of destructive cascading effects and ensures the isolation of child components from unauthorized or critical changes in parent templates. A hierarchical locking mechanism has been developed, allowing to set protection against changes at various nesting levels – from a single property to the entire 3D model along with its child elements – which guarantees logic determinism during scenario runtime.

2. Based on the analysis of algorithmic links between the geometry and the scenario logic, a method *has been proposed* for automatically removing the internal topology of nodes that are not involved in a specific scenario, leaving only their outer shell. Unlike classical blind geometric decimation algorithms, this significantly reduces the load on the visualization system without losing information critical for training.

3. *For the first time*, a method *has been proposed* for managing the volume of information in the scene to ensure an acceptable cognitive load on the user. The method is based on Cognitive Load Theory and allows keeping the amount of information within the capacity of the user's working memory in accordance with the simulation complexity level (set by the instructor or the student). The method includes:

- proactive notification of the instructor about potential cognitive overload (the number of simultaneously possible active objects and actions exceeds the established norm) during scenario creation;
- visual dimming of objects not involved in current transitions during scenario execution, which provides a dynamic reduction of the impact of information in the scene located within the user's field of view;
- automatic conversion of a portion of actions, specified by the instructor, into automatic and/or silent τ -transitions during scenario execution (which allows automating the execution of steps that are not critical for the selected difficulty level).

4. *For the first time*, an analytical-parametric method of harmonic state replication *has been developed* for the distributed network synchronization of training complexes. It is substantiated that, unlike classical algorithms (DIS IEEE 1278.1 standard), which rely on polynomial extrapolation (Dead Reckoning) and suffer from intense cumulative error growth during high-frequency oscillations (vibrations), the proposed method is based on the event-driven transmission of spectral parameters (frequency, amplitude, timestamp), which makes the network

traffic volume invariant to the object's oscillation frequency. The use of a global timestamp ensures the preservation of phase coherence under conditions of network latency fluctuations (jitter), guaranteeing the synchronous perception of high-frequency dynamic processes and emergency modes by all participants. At the same time, delegating computations to the vertex shader level of the graphics processing unit ensures diagnostically equivalent visual mapping without involving heavy computer-aided engineering (CAE) systems.

The practical result of the work is the creation of software and algorithmic support and the development of a prototype in the form of functional modules of information technology for creating interactive 3D model-based scenarios for training nuclear power plant pump repair specialists. The prototype includes a visual scenario editor that will enable subject matter experts to create training scenarios for their subsequent deployment in a cloud environment or as autonomous local simulators without involving programmers. The practical application of the method for automatically removing the internal topology of nodes ensures stable visualization of industrial equipment in web browsers and algorithmically enhances the protection of the manufacturers' proprietary drawings, reducing the possibilities of unauthorized copying of equipment designs (reverse engineering). The testing of the prototype on test groups confirmed its operability and algorithmic stability. Experimental testing of the network architecture recorded a significant reduction in the volume of transmitted data under conditions of simulated degraded communication channels.

Main content of the thesis by chapters:

The Introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates the goal, tasks, object, subject, and research methods, highlights the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and provides information on testing and applicant's publications.

Chapter 1 conducts a critical analysis of the current state, methods, and tools for training nuclear power plant (NPP) pump repair specialists.

Technological barriers constraining the creation of training materials for NPP maintenance personnel are identified, including issues related to excessive engineering data detail, scenario development complexity, and network synchronization limitations. The expediency of adopting a No-Code approach to involve domain experts without programming skills, a client-side rendering architecture within the framework of Green Computing, and Cognitive Load Theory for adapting the scenario structure and visual representation to the chosen difficulty level is substantiated.

Chapter 2 develops mathematical models and methods for constructing interactive multi-user scenarios using 3D models of pumping equipment. It proposes an information model of virtual educational objects based on the "Template-Instance" paradigm with dependency pinning and hierarchical locking mechanisms. A Role-Based Interaction Model (RBIM) grounded in hierarchical Petri nets is established to represent sequential-parallel participant actions, analyze state space automatically, and detect deadlocks and mutual blockings. Additionally, an automated method for removing the internal topology of nodes not involved in a specific scenario, a cognitive load management method to maintain information volume within working memory capacity according to a specified difficulty level, and an analytical-parametric harmonic state replication method are developed.

Chapter 3 details the algorithmic and software implementation of the developed system. It describes the microservice client-server architecture of the software suite, engineering 3D data preparation and optimization algorithms, functional modules of the visual scenario editor, static analyzer, adaptive client-side execution engine (Runtime Engine), and network synchronization algorithmic support in a distributed environment.

Chapter 4 presents the practical implementation results of the developed information technology as a functional simulator prototype for NPP pumping equipment. It provides experimental evaluation results regarding the efficiency

of network synchronization algorithms, environmental and infrastructural performance assessments, and evaluation of educational content development acceleration. The testing results confirm the statistical significance of trainees' practical skill formation improvement.

The Conclusions summarize the main scientific and practical outcomes of the dissertation research, confirm the fulfillment of all assigned tasks, and outline prospects for further practical application of the technology.

Keywords: information system, local simulator, mobile web application, data processing and storage, 3D models, 3D modeling, 3D environment, personnel training, interactive training program, data visualization, Petri nets, network synchronization, state space, microservice architecture, parallel simulation.

List of publications of the applicant:

Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Shevchenko T., Shams Esfandabadi Z., Ranjbari M., Saidani M., Mesa J., **Shevchenko S.** et al. Metrics in the circular economy: An inclusive research landscape of the thematic trends and future research agenda. *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 165. 112182. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112182. (Scopus, Q1)

Personal contribution: participated in the development of the research methodology and the substantiation of the impact of digital tools on resource efficiency and environmental performance indicators.

2. **Shevchenko S.**, Shevchenko S. Increasing the Operational Safety of NPP Pumping Equipment by Using Interactive Automated Remote Educational and Training Systems. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. Vol. 1(101). P. 19–27. DOI: 10.32918/nrs.2024.1(101).02. (Scopus, Q3)

Personal contribution: developed the architecture of an interactive remote training system for NPP personnel and proposed a methodology for visualizing pumping equipment.

3. **Shevchenko S. S.** A comprehensive approach and a role-based interaction model for designing cooperative scenarios in interactive training systems. *Electronic Modeling*. 2025. Vol. 47, No. 5. P. 75–86. DOI: 10.15407/emodel.47.05.075. (in Ukrainian)
4. **Shevchenko S. S.** Algorithmic support for verification and execution of cooperative scenarios in distributed training systems. *Infocommunication and computer technologies*. 2025. No. 2 (10). P. 142–149. DOI: 10.36994/2788-5518-2025-02-10-18. (in Ukrainian)

Scientific papers that certify the testing of the dissertation materials:

1. **Shevchenko S. S.** Creation of interactive automated educational and training systems. *Problems of Informatics and Modeling (PIM-2023): Book of abstracts of the 23rd Int. Sci.-Tech. Conf. (Kharkiv, 2023).* Kharkiv : NTU "KhPI", 2023. P. 102–104.
2. **Shevchenko S. S.** Interactive automated remote educational and training systems as an important link in the resilience of critical infrastructure. *Resilience of critical infrastructure – 2023: Proc. of the Sci.-Pract. Conf. (Kyiv, June 21, 2023).* Kyiv, 2023. P.102–103. *(in Ukrainian)*
3. **Shevchenko S. S.** Choice of technologies for the creation of interactive automated remote educational and training systems. *Technologies for the creation and use of the critical infrastructure personnel training tools – 2023: Proc. of the Sci.-Pract. Conf. (Kyiv, November 8, 2023).* Kyiv, 2023. P.32–34. *(in Ukrainian)*
4. **Shevchenko S. S.** Improving personnel qualifications as a means of enhancing energy security in the digital age. *Energy Security in the Era of Digital Transformation: Proc. of the 5th Sci.-Pract. Conf. (Kyiv, November 22, 2023).* Kyiv, 2023. P.117–119. *(in Ukrainian)*
5. **Shevchenko S. S.** Improving the efficiency of using diagnostic information by implementing an interactive training system for NPP personnel. *Technical diagnostics of NPP equipment: Proc. of the Sci.-Pract. Conf. (Kyiv, December 6, 2023).* Kyiv, 2023. P.55–56. *(in Ukrainian)*
6. **Shevchenko S. S.** Issues of content and source material security in interactive educational systems. *XLII Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering (Kyiv, May 15, 2024).* Kyiv, 2024. P.52–53. *(in Ukrainian)*
7. **Shevchenko S. S.** Interactive automated remote educational and training systems as a tool for improving energy security in the digital age.

Perspectives for the Implementation of Innovations in Nuclear Energy: Proc. of the 6th Int. Conf. (Kyiv, September 27, 2024). Kyiv, 2024. P.222–224. (in Ukrainian)

8. **Shevchenko S. S.**, Vinnychuk S. D. The role of automated educational platforms in ensuring the resilience of dynamic systems to external changes. *Resilience of Dynamic Systems: Proc. of the Sci.-Pract. Conf. (Kyiv, December 27, 2024). Kyiv, 2024. P.128–129. (in Ukrainian)*

Personal contribution: substantiated the role of automated platforms in ensuring the resilience of dynamic systems.

9. **Shevchenko S. S.** Synchronized collaborative training as a tool for improving teamwork efficiency in the energy sector. *XLIII Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering (Kyiv, May 14, 2025). Kyiv, 2025. P.71–73. (in Ukrainian)*

10. **Shevchenko S. S.** Modeling cyberattack scenarios in interactive 3D environments as a tool to increase the cyber resilience of energy enterprise personnel. *Cybersecurity of Energy: Proc. of the Sci.-Pract. Conf. (Kyiv, May 28, 2025). Kyiv, 2025. P.55–56. (in Ukrainian)*

**Scientific papers that additionally reflect the scientific results of the
dissertation:**

1. Pat. 149786 Ukraine, IPC (2021.01) G09B 19/00. Interactive automated remote educational and training system / **S. S. Shevchenko**; applicant and patent holder S. S. Shevchenko. – No. u 2021 05876; declared 19.10.2021; published 01.12.2021, Bul. No. 48. *(in Ukrainian)*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	23
ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ СТВОРЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ СИСТЕМ НАВЧАННЯ РЕМОНТНОГО ПЕРСОНАЛУ	33
1.1. Сучасний стан та актуальні питання підготовки персоналу енергетичних об'єктів (зокрема атомних станцій)	33
1.2. Аналіз існуючих підходів до створення навчальних засобів	35
1.3. Технологічні бар'єри при створенні та експлуатації інтерактивних сценаріїв.....	40
1.4. Екологічна та інфраструктурна ефективність цифровізації процесів підготовки персоналу («Green Computing»)	45
1.5. Постановка задачі дослідження	47
1.6. Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОБУДОВИ ІНТЕРАКТИВНИХ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ 3D- МОДЕЛЕЙ.....	51
2.1. Інформаційна модель віртуальних навчальних 3D-моделей та формалізація процесу трансформації інженерних даних.....	51
2.2. Формальна модель рольової взаємодії (MPV) у віртуальному середовищі.....	59
2.3. Метод управління обсягом інформації на сцені на основі теорії когнітивного навантаження	71
2.4. Аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів у розподіленому середовищі	75
2.5. Концептуальна схема інформаційної технології створення та виконання інтерактивних сценаріїв	80
2.6. Висновки до розділу 2.....	82
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТВОРЕННЯ ТА ВИКОНАННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ 3D-МОДЕЛЕЙ	84

3.1. Загальна архітектура програмного комплексу інтерактивного навчання.....	84
3.2. Алгоритмічна реалізація методу автоматичного видалення внутрішньої топології віртуальних 3D-моделей	91
3.3. Алгоритмічне забезпечення візуального створення сценаріїв, їх верифікації та управління когнітивним навантаженням	94
3.4. Архітектура та програмна реалізація клієнтського механізму виконання сценаріїв (Runtime Engine).....	103
3.5. Алгоритмічне забезпечення мережевої синхронізації на основі методу реплікації гармонічних станів	114
3.6. Висновки до розділу 3.....	118
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	122
4.1. Практична реалізація технології на прикладі навчального сценарію для насосного обладнання АЕС	122
4.2. Експериментальне дослідження ефективності алгоритмів синхронізації	126
4.3. Оцінка екологічної та інфраструктурної ефективності рішень («Green Computing»).....	131
4.4. Оцінка ефективності автоматизації процесу розробки навчального контенту	136
4.5. Апробація прототипу системи та перспективи впровадження	139
4.6. Висновки до розділу 4.....	141
ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	147
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача	163
ДОДАТОК Б. Акти та довідки про використання (апробацію) результатів дисертаційної роботи	167
ДОДАТОК В. Формалізований опис алгоритмів та структур даних системи	171
ДОДАТОК Г. Приклади моделювання багатокористувацьких сценаріїв на базі Моделі Рольової Взаємодії (МРВ)	176

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

API	–	Application Programming Interface (Програмний інтерфейс застосунку)
BPMN	–	Business Process Model and Notation (Нотація моделювання бізнес-процесів)
CAD	–	Computer-Aided Design (Система автоматизованого проєктування)
CPU	–	Central Processing Unit (Центральний процесор)
DLP	–	Data Leakage Prevention (Запобігання витоку даних)
FPS	–	Frames Per Second (Кадрів на секунду)
GPU	–	Graphics Processing Unit (Графічний процесор)
HCPN	–	Hierarchical Colored Petri Nets (Ієрархічні кольорові мережі Петрі)
JSON	–	JavaScript Object Notation (Текстовий формат обміну даними)
LMS	–	Learning Management System (Система управління навчанням)
NTP	–	Network Time Protocol (Протокол мережевого часу)
POR	–	Partial Order Reduction (Редукція часткового порядку)
RBAC	–	Role-Based Access Control (Управління доступом на основі ролей)
RTT	–	Round-Trip Time (Час кругового обертання сигналу)
TCP	–	Transmission Control Protocol (Протокол керування передачею)
VR	–	Virtual Reality (Віртуальна реальність)
WebGL	–	Web Graphics Library (Веб-бібліотека графіки)
xAPI	–	Experience API (Специфікація передачі даних про навчальні події)

XR	–	Extended Reality (Розширена реальність)
АЕС	–	Атомна електростанція
ГЦН	–	Головний циркуляційний насос
МРВ	–	Модель рольової взаємодії
ЦНС	–	Відцентровий насос секційний
3D-модель (у контексті дисертації)	–	комплексний віртуальний інформаційний об'єкт, що складається з геометричної топології, кінематичних обмежень, бази локальних властивостей та функцій реакцій, і призначений для інтерактивної взаємодії у віртуальному навчальному середовищі.

ВСТУП

Актуальність теми. Створення комп'ютерних навчальних мультимедійних засобів для підготовки фахівців з ремонту насосів атомних електричних станцій передбачає розробку сценаріїв, їх верифікацію та візуалізацію. При виконанні ремонтних робіт приймають участь ряд спеціалістів, тому сценарії є багатокористувацькими, де кожен зі спеціалістів виконує певну визначену йому роль. Для створення сценаріїв на даний час існує ряд систем опису діяльності з урахуванням ролей, наприклад, BPMN 2.0, для яких проблемними є вирішення завдань верифікації. Сценарій у вигляді мережі Петрі – це математична модель, на аналізі якої можна вирішити завдання верифікації, проте в них не передбачено врахування ролей учасників сценарію. При візуалізації процесів виконання сценарію з використанням 3D-моделей насосного обладнання важливо реалізувати коректне з'єднання елементів насоса, врахувати ймовірність візуального перевантаження користувача, а також знизити вплив мережевих затримок на процес спільної взаємодії.

Тому актуальним є завдання з розробки інформаційної технології створення сценаріїв, їх верифікації та візуалізації при навчанні спеціалістів з ремонту насосного обладнання АЕС на основі представлення сценарію як мережі, заснованої на ідеї мереж Петрі із врахуванням ролей учасників сценарію, що дозволяє вирішувати завдання верифікації сценаріїв, а для уникнення візуального перевантаження при візуалізації дозволяє обмежувати обсяг інформації на сцені.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до плану наукових досліджень ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України та в межах пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні.

Мета і завдання дослідження. Розроблення інформаційної технології, що одночасно забезпечує створення, верифікацію, візуалізацію та синхронне відтворення для всіх учасників інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей для навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій.

Для досягнення мети сформовано наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи створення інтерактивних навчальних систем та виявити обмеження існуючих підходів до створення сценаріїв та віртуальних об'єктів, обробки інженерних 3D-даних, утримання у межах норми когнітивного навантаження та мережевої синхронізації даних.
2. Розробити структуру та спосіб представлення навчальних 3D-моделей із механізмом фіксації залежностей наслідування й ієрархічного блокування.
3. Розробити модель структури сценарію на базі ієрархічних мереж Петрі, що забезпечить детермінованість логіки та автоматизоване виявлення тупикових ситуацій і взаємних блокувань.
4. Розвинути метод обробки та представлення інженерних 3D-даних шляхом автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, які не задіяні у конкретному сценарії, для зниження навантаження на систему візуалізації.
5. Розробити метод управління обсягом інформації на сцені для забезпечення прийняттого когнітивного навантаження на користувача відповідно до заданого рівня складності навчання.
6. Розробити аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів для розподіленої мережевої синхронізації, що забезпечує збереження фазової узгодженості в умовах флуктуацій мережевої затримки.
7. Здійснити програмну реалізацію розроблених моделей і методів у вигляді функціональних модулів та апробувати їх.

Об'єкт дослідження: процеси представлення, обробки, зберігання та передачі інформації при створенні та виконанні інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей для підготовки спеціалістів з виконання робіт з ремонту насосів атомних станцій.

Предмет дослідження: інформаційна технологія зі створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій, верифікація цих сценаріїв та їх відтворення.

Методи дослідження: аналіз предметної області (для дослідження існуючих підходів до підготовки ремонтного персоналу АЕС та виявлення технологічних бар'єрів при створенні інтерактивних навчальних систем), методи теорії графів та апарат мереж Петрі (для дослідження логіки рольової взаємодії користувачів, моделювання простору досяжних станів та аналізу багатокористувацьких сценаріїв на наявність тупикових ситуацій), методи об'єктно-орієнтованого проєктування (для дослідження інформаційної структури віртуальних 3D-моделей та аналізу їхніх ієрархічних залежностей), методи алгоритмічної обробки просторових даних (для дослідження топологічної структури інженерних CAD-моделей та аналізу просторових зв'язків), методи проєктування людино-машинної взаємодії (для дослідження впливу обсягу візуальної інформації на когнітивне навантаження користувача), методи математичного моделювання (для дослідження процесів реплікації кінематичних даних у розподілених середовищах із затримками), методи емпіричного тестування та математичної статистики (для оцінки ефективності розроблених алгоритмів та підтвердження значущості результатів апробації). Обґрунтованість вибору зазначених методів зумовлена їхньою адекватністю специфіці поставлених завдань у галузі комп'ютерних наук, що забезпечує високу достовірність отриманих результатів і висновків дисертаційної роботи.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. *Дістала подальшого розвитку* технологія створення інтерактивних навчальних сценаріїв, що включає:

- запропоновану модель сценарію як мережі, заснованої на апараті ієрархічних мереж Петрі, де можливим є послідовне та паралельне

виконання дій, послідовність яких визначається на основі функціональних обов'язків (ролей) учасників (модель рольової взаємодії у віртуальному середовищі (MPB)). На відміну від класичних мереж Петрі модель пов'язує дискретні стани 3D-моделей з цілеспрямованими діями конкретних ролей, сформованими за принципом передумова → наслідок. На відміну від методів побудови сценаріїв (наприклад, стандарту BPMN 2.0), забезпечується автоматична верифікація сценарію, у тому числі оцінка наявності тупикових ситуацій та взаємних блокувань;

- *вперше запропоновану інформаційну модель віртуальних навчальних 3D-моделей, представлену кортежем, що включає дані про геометрію, характерні властивості, кінематичні обмеження та функції реакцій. У ній, на відміну від традиційних архітектур 3D-рушіїв, розширено можливості об'єктно-орієнтованого наслідування на архітектуру ієрархічних графів 3D-моделей та інтегровано механізм фіксації залежностей, що усуває ризик деструктивного каскадного ефекту та забезпечує ізоляцію дочірніх компонентів від несанкціонованих або критичних змін у батьківських шаблонах. Розроблено механізм ієрархічного блокування, що дозволяє встановлювати захист від змін на різних рівнях вкладеності: від окремої властивості до 3D-моделі цілком разом із її дочірніми елементами – що гарантує детермінованість логіки під час виконання (Runtime) сценарію.*

2. На основі аналізу алгоритмічних зв'язків між геометрією та логікою сценарію *запропоновано* метод автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, які не задіяні у конкретному сценарії, із залишенням їх зовнішньої оболонки, що, на відміну від класичних алгоритмів сліпої геометричної децимації, суттєво знижує навантаження на систему візуалізації без втрати важливої для навчання інформації.

3. *Вперше запропоновано* метод управління обсягом інформації на сцені для забезпечення прийняттого когнітивного навантаження на користувача, що ґрунтується на теорії когнітивного навантаження (Cognitive Load Theory) і дозволяє утримувати обсяг інформації в межах пропускної здатності робочої

пам'яті користувача відповідно до заданого (інструктором або учнем) рівня складності симуляції. Метод включає:

- проактивне сповіщення інструктора про можливе когнітивне перевантаження (кількість одночасно доступних активних об'єктів та дій перевищує встановлену норму) при створенні сценарію;
- візуальне приглушення об'єктів, не задіяних у поточних переходах при виконанні сценарію, яка забезпечує динамічне зниження впливу інформації на сцені, що знаходиться в полі зору користувача;
- автоматичне конвертування частини дій, визначених інструктором, у автоматичні або/та мовчазні τ -переходи при виконанні сценарію (що дозволяє автоматизувати виконання етапів, які не є критичними для обраного рівня складності).

4. *Вперше розроблено аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів для розподіленої мережевої синхронізації навчальних комплексів.* Обґрунтовано, що на відміну від класичних алгоритмів (стандарту DIS IEEE 1278.1), які спираються на поліноміальну екстраполяцію (Dead Reckoning) і зазнають інтенсивного кумулятивного зростання помилок при високочастотних осциляціях (вібраціях), запропонований метод базується на подієвій трансляції спектральних параметрів (частоти, амплітуди, мітки часу), що робить обсяг мережевого трафіку інваріантним до частоти коливань об'єкта. А використання глобальної часової мітки забезпечує збереження фазової узгодженості в умовах флуктуацій мережевої затримки (джиттеру), гарантуючи синхронне сприйняття високочастотних динамічних процесів та аварійних режимів усіма учасниками. Водночас делегування обчислень на рівень вершинних шейдерів графічного процесора забезпечує візуально-діагностичну еквівалентність відображення без залучення важких систем інженерного моделювання (CAE).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. Наукові положення, висновки та рекомендації, що

виносяться на захист, одержані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному:

- у праці [Shevchenko T. et al., 2024] приймав участь у розробці методології дослідження та обґрунтуванні впливу цифрових інструментів на показники сталого розвитку;
- у праці [Shevchenko S. et al., 2024] розроблено архітектуру інтерактивної системи дистанційного навчання для персоналу АЕС та запропоновано методику візуалізації насосного обладнання;
- у праці [Шевченко, Винничук, 2024] (спільно з науковим керівником С. Д. Винничуком) обґрунтовано роль автоматизованих платформ у забезпеченні резильєнтності динамічних систем;
- Решта наукових праць [Shevchenko S., 2023; Шевченко, 2021, 2023а, 2023б, 2023с, 2023д, 2024а, 2024б, 2025а, 2025б, 2025с, 2025д] підготовлені та опубліковані здобувачем одноосібно.

Практичне значення одержаних результатів. Практичним значенням роботи є створення програмно-алгоритмічного забезпечення та розробка прототипу у вигляді функціональних модулів інформаційної технології створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій. Прототип включає візуальний редактор сценаріїв, що дозволить експертам предметної області створювати навчальні сценарії для їх подальшого розгортання у хмарному середовищі або як автономних локальних симуляторів без залучення програмістів. Застосування методу автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів на практиці дозволяє забезпечити стабільну візуалізацію промислового обладнання у веб-браузерах та алгоритмічно підвищує захист пропрієтарних креслень виробників,

знижуючи можливості несанкціонованого копіювання конструкцій обладнання (реверс-інжинірингу). Апробація прототипу на тестових групах підтвердила його працездатність, алгоритмічну стійкість. Експериментальні тестування мережевої архітектури зафіксували суттєве зменшення обсягу переданих даних в умовах імітації деградованих каналів зв'язку.

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 15 наукових працях, з яких 2 статті у фахових виданнях України, 2 у виданнях, що індексуються в Scopus/WoS, а також у тезах доповідей на конференціях. Технічні рішення, що стали підґрунтям для проведення дисертаційного дослідження, захищено Патентом України на корисну модель № 149786.

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію через представлення на науково-практичних та науково-технічних конференціях: Двадцять третя міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023)”, м. Харків, 20-22 вересня 2023 року; Науково-практична конференція “Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023”, м. Київ, 21 червня 2023 року; Науково-практична конференція “Технології створення і використання засобів підготовки персоналу на об’єктах критичної інфраструктури – 2023”, м. Київ, 8 листопада 2023 року; V Науково-практична конференція “Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації”, м. Київ, 22 листопада 2023 року; Науково-практична конференція “Технічна діагностика обладнання АЕС”, м. Київ, 6 грудня 2023 року; XLII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 15 травня 2024 року; VI міжнародна конференція “Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику”, м. Київ, 27 вересня 2024 року; Науково-практична конференція “Резильєнтність динамічних систем”, м. Київ, 27 грудня 2024 року; XLIII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН

України, м. Київ, 14 травня 2025 року; Науково-практична конференція “Кібербезпека енергетики”, м. Київ, 28 травня 2025 року.

Використання інструментів штучного інтелекту. Під час підготовки дисертації здобувач використовував такі інструменти штучного інтелекту: Gemini 2.5 Pro, Gemini 3 Pro Preview, Gemini 3.1 Pro Preview як допоміжні інструменти для перекладу тексту, покращення зв'язності та зрозумілості викладу, а також мовного й стилістичного редагування окремих фрагментів тексту. Усі фрагменти тексту, під час підготовки яких застосовувалися зазначені інструменти, особисто перевірено й відредаговано. Здобувач несе повну відповідальність за зміст, достовірність і обґрунтованість результатів дисертаційної роботи. Наукові положення, висновки та результати є власним інтелектуальним внеском автора.



Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, списку публікацій здобувача, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 183 сторінки, з яких основний текст викладено на 122 сторінках. Робота містить 2 таблиці, 20 рисунків. Список використаних джерел налічує 117 найменувань (з них 96 іноземною мовою) і займає 16 сторінок. Робота містить 4 додатки на 21 сторінці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ СТВОРЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ СИСТЕМ НАВЧАННЯ РЕМОНТНОГО ПЕРСОНАЛУ

1.1. Сучасний стан та актуальні питання підготовки персоналу енергетичних об'єктів (зокрема атомних станцій)

Сучасна енергетична галузь, що є основою критичної інфраструктури держави, характеризується безперервним зростанням технологічної складності об'єктів управління. Ядерні реактори, теплові електростанції та розподільчі мережі являють собою складні людино-машинні системи, надійність яких залежить не лише від якості технічного оснащення, але й, значною мірою, від дій оперативного та ремонтного персоналу у сучасній парадигмі Індустрії 5.0 [Martínez-Gutiérrez et al., 2024; Wang B. et al., 2024] та концепції енергетичного метавсесвіту [Zhang B. et al., 2024].

Як зазначається у дослідженнях [Shevchenko S. et al., 2024], головна увага під час експлуатації таких об'єктів, особливо атомних електростанцій (АЕС), приділяється питанням ядерної та радіаційної безпеки. Насосне обладнання, зокрема головні циркуляційні насоси (ГЦН), виступає одним із найважливіших елементів системи безпеки. Масштаби технологічних процесів підтверджують критичність цього обладнання: наприклад, витрата води в першому контурі енергоблоку ВВЕР-1000 досягає 80 000 м³/год, а споживана потужність насосного обладнання може складати до 12% від потужності всього енергоблоку [Shevchenko S. et al., 2024]. Відмова або некоректна робота таких агрегатів може призвести до катастрофічних наслідків. При цьому критично важливим етапом життєвого циклу є не лише експлуатація, а й технічне обслуговування та ремонт насосів, які виконуються бригадним методом. Спільна робота групи спеціалістів різних профілів (слюсарів, електриків, майстрів) вимагає жорсткої координації та безпомилкової послідовності дій.

Аналіз аварійних ситуацій та інцидентів на промислових підприємствах свідчить, що «людський фактор» залишається однією з ключових причин відмов. Помилки персоналу часто виникають не через відсутність базових теоретичних знань, а через:

- нездатність швидко інтерпретувати діагностичну інформацію в умовах стресу;
- відсутність стійких сенсомоторних навичок при виконанні рідкісних, але критично важливих операцій (наприклад, перемикання режимів або аварійна зупинка);
- недостатнє розуміння просторової конфігурації та внутрішньої будови складних вузлів, які приховані під захисними кожухами під час нормальної експлуатації.

В умовах цифровізації енергетики поняття безпеки трансформується. Окрім фізичної надійності, виникає потреба у забезпеченні резильєнтності (стійкості) систем до зовнішніх змін та кіберзагроз [Шевченко, 2023а; Шевченко, Винничук, 2024]. Персонал стає «останнім рубежем» захисту: оператор повинен вміти не лише слідувати інструкціям, а й розпізнавати аномальну поведінку автоматизованих систем управління, яка може свідчити про кібератаку або збій датчиків [Шевченко, 2023с; Шевченко, 2025с]. Це вимагає від фахівців глибокого розуміння фізики процесів (наприклад, візуального розпізнавання аномальних високочастотних вібрацій чи кавітації) та логіки роботи обладнання, а не лише механічного заучування регламентів.

Ситуація ускладнюється тим, що навички обслуговування унікального обладнання (наприклад, розбирання та дефектація ротора насоса) неможливо отримати шляхом «спроб і помилок» на діючому об'єкті через неприпустимість ризиків, що підтверджується досвідом підготовки операторів критичних ядерних установок [Li J. et al., 2019; Regal et al., 2023] та загальними складнощами передачі експертних знань новому поколінню

інженерів [Rovaglio et al., 2012]. Відтак, існує розрив між зростаючими вимогами до компетенцій персоналу та можливостями традиційних засобів підготовки забезпечити ці компетенції без доступу до реального обладнання.

Ефективність роботи з діагностичною інформацією та швидкість прийняття рішень прямо корелюють з якістю попередньої підготовки. Фахівець, який під час навчання мав можливість візуально дослідити внутрішню структуру агрегату, змодельовати протікання рідини та побачити наслідки помилкових дій у безпечному середовищі, демонструє значно вищу надійність у реальній роботі [Шевченко, 2023d]. Крім того, інтеграція цифрових двійників та метавсесвіту визнається ключовим фактором підвищення безпеки та охорони праці (OHS) на виробництві [Zahid et al., 2025].

Таким чином, підвищення кваліфікації персоналу перетворюється з кадрового питання на пріоритетний інженерно-технічний виклик у сфері забезпечення безпеки. Для подолання цього виклику необхідно впровадити новітні інформаційні технології, що здатні створити достатньо реалістичне середовище для набуття досвіду без ризиків для обладнання та життя людей [Шевченко, 2024b].

1.2. Аналіз існуючих підходів до створення навчальних засобів

Ефективність підготовки персоналу визначається здатністю навчальної системи відтворити реальні умови експлуатації та сформувати у фахівця необхідні компетенції з мінімальними витратами ресурсів і часу. На сьогодні в енергетичній галузі сформувалася ієрархія методів навчання, які можна класифікувати за рівнем інтерактивності, вартістю впровадження та масштабованістю. Проведемо аналіз основних груп засобів підготовки.

1) Традиційні (пасивні) методи навчання. До цієї групи належать лекційні заняття, вивчення технічної документації (креслень,

технологічних карт), інструктажів. Ці методи залишаються базовими через низьку вартість організації. Проте, як зазначається в [Шевченко, 2023с], вони мають суттєві недоліки в контексті інженерної підготовки:

Відсутність просторової візуалізації: Креслення у 2D-форматі не дають повного уявлення про компонування складних вузлів (наприклад, внутрішню структуру проточної частини насоса або системи ущільнень).

Пасивність сприйняття: Відсутність зворотного зв'язку та неможливість відпрацювання моторики дій призводить до того, що знання залишаються теоретичними і не трансформуються у стійкі навички.

2) Фізичні навчально-тренувальні центри (НТЦ) та повномасштабні тренажери. Це спеціалізовані полігони, оснащені реальними зразками обладнання (наприклад, розрізні моделі насосів, пультів управління), які виведені з експлуатації або спеціально виготовлені для навчання. Вони забезпечують найвищий рівень реалізму та тактильних відчуттів. Однак, системний аналіз виявляє критичні недоліки цього підходу в сучасних умовах:

Економічна неефективність: Вартість створення фізичного макета складного агрегату є надзвичайно високою. Крім того, фізичні тренажери потребують значних площ для розміщення та витрат на обслуговування.

Низька масштабованість: Пропускна здатність фізичного стенду обмежена (одна група за один раз). Це унеможлиблює масове дистанційне навчання, що є критичним в умовах розосередженості об'єктів енергетики.

Екологічний та інфраструктурний аспект («Green Computing»): В контексті ресурсощадних ІТ-стратегій, виробництво фізичних макетів генерує значний вуглецевий слід (видобуток металу, обробка,

логістика). Більше того, при модернізації обладнання на станції фізичні макети морально застарівають і перетворюються на металобрухт, що потребує утилізації. Як показано в роботі [Shevchenko T. et al., 2024], цифровізація активів дозволяє реалізувати принципи ресурсощадності та екологічних обчислень («Green Computing»), замінюючи матеріаломісткі фізичні об'єкти їхніми віртуальними аналогами («дематеріалізація навчання»).

3) Комп'ютерні тренажери (CBT – Computer Based Training). Ця категорія охоплює широкий спектр програмних засобів: від простих мультимедійних курсів до складних симуляторів.

2D-слайдові системи: Зазвичай реалізовані в стандартах SCORM/LMS. Вони ефективні для перевірки теоретичних знань, але нездатні симулювати технологічні процеси у повному обсязі життєвого циклу [Ulmer et al., 2019].

Відео-навчання: Дозволяє побачити процес, але не дає можливості втрутитися в нього або змінити сценарій.

4) Інтерактивні 3D-середовища та системи віртуальної реальності (VR). Це найбільш прогресивний напрямок, що дозволяє моделювати будь-які ситуації у віртуальному просторі [Shevchenko S., 2023; Шевченко, 2023b], забезпечуючи глибокий ефект занурення (імерсивності) [Psotka, 1995] та високу ефективність відпрацювання механічних операцій [Peniche et al., 2011]. Користувач отримує можливість взаємодіяти з обладнанням: розбирати вузли, перемикати режими, спостерігати за фізичними процесами (потіки рідини, вібрація), які неможливо побачити на реальному об'єкті через захисні кожухи.

Проте аналіз існуючих реалізацій виявляє ряд технічних бар'єрів:

Недолік «Stand-alone» додатків: Більшість високоякісних навчальних засобів розробляються як десктопні додатки (exe-файли), що вимагають інсталяції, потужних графічних станцій та складного адміністрування. Це

ускладнює їх розгортання в корпоративних мережах з суворою політикою безпеки.

Обмеження Web-рішень: Існуючі веб-орієнтовані (WebGL) рішення часто мають спрощену графіку та примітивну логіку, нездатну відтворити складні фізичні залежності роботи енергетичного обладнання.

Ще одним суттєвим недоліком існуючих 3D-навчальних засобів є статичність їхньої структури. Вони не здатні динамічно адаптувати логіку та візуальне представлення сценарію під заданий рівень складності навчання. Через це під час вивчення складних багатокомпонентних агрегатів обсяг інформації часто виходить за межі пропускної здатності робочої пам'яті користувача, що, згідно з теорією когнітивного навантаження (Cognitive Load Theory), призводить до неефективного засвоєння матеріалу та помилок.

Значний внесок у розвиток методології створення навчальних засобів для енергетики зроблено науковою школою Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Фундаментальні принципи сценарного моделювання та використання графічних нотацій для опису логіки тренажерів були закладені ще у роботах [Самойлов, Нетлюх, 2009; Абрамович et al., 2014]. Авторами було обґрунтовано необхідність відокремлення моделі навігації від програмного коду, що стало базисом для сучасних підходів.

Еволюційний розвиток цих ідей призвів до формування концепції переходу від ресурсоємного об'єктно-математичного моделювання до імітаційно-технологічного та сценарно-педагогічного методів [Абрамович, Самойлов, 2019; Бальва et al., 2019]. Сучасні дослідження інституту демонструють ефективність створення локальних тренажерів (local simulators) на базі графічних нотацій (наприклад, BPMN) для проведення навчальних сесій (training sessions) із залученням до проєктування безпосередньо експертів-технологів [Абрамович et al., 2018; Самойлов et al.,

2020; Плетяний et al., 2023]. Проте, ці фундаментальні напрацювання здебільшого орієнтовані на індивідуальне навчання (наприклад, оперативні перемикання на 2D-мнемосхемах). Як зазначається у монографії [Абрамович, Самойлов, 2021], використання стандарту BPMN має суттєві обмеження при моделюванні складних процесів типу «Ad-Hoc», де кількість вкладених операцій не обмежується, а послідовність їх виконання визначається самими учасниками в ході роботи. Саме така ситуація є типовою для бригадного ремонту насосного обладнання. Тому існуючі підходи потребують еволюційного розширення: переходу від нотації BPMN до більш потужного математичного апарату (наприклад, мереж Петрі) для управління синхронною кооперативною взаємодією кількох користувачів безпосередньо у 3D-просторі, а також інструментів верифікації сценаріїв. Існуючі підходи до побудови багатокористувацьких графів позбавлені алгоритмів автоматичного виявлення та усунення взаємних блокувань (deadlocks), які виникають при паралельних діях різних ролей.

5) Порівняльна характеристика. Узагальнюючи, можна стверджувати, що існує розрив між потребами галузі та наявними інструментами. Фізичні тренажери – занадто дорогі та «неповороткі». Існуючі програмні рішення – або занадто складні у впровадженні (VR/Desktop), або недостатньо функціональні (Web/2D).

Окремим бар'єром є відсутність гнучкості у створенні контенту. Більшість існуючих навчальних систем побудована на монолітній архітектурі, де 3D-об'єкти та їхня поведінка є «жорстко запрограмованими» сутностями (hardcoded). Логіка взаємодії нерозривно пов'язана з конкретною 3D-моделлю, що унеможливорює її багаторазове використання (reusability) у різних навчальних ситуаціях без переписування програмного коду. Зміна сценарію навчання (наприклад, при зміні регламенту ремонту) вимагає втручання розробників коду, що затягує процес оновлення навчальної бази на місяці. Більше того, нестабільність ієрархічних зв'язків

унаслідуваних 3D-моделей у таких монолітних системах призводить до деструктивних каскадних збоїв при будь-яких оновленнях геометрії чи логіки, що не гарантує детермінованості поведінки об'єктів під час виконання сценарію.

Відтак, перспективним напрямком є створення універсальних програмних платформ, які б поєднували доступність веб-технологій, реалізм 2D/3D-моделювання (2D/3D modeling) та гнучкість конструкторів сценаріїв (No-Code), дозволяючи швидко адаптувати навчальний контент під потреби конкретного насосного обладнання.

1.3. Технологічні бар'єри при створенні та експлуатації інтерактивних сценаріїв

Незважаючи на доведену ефективність віртуальних навчальних систем, їх масове впровадження на підприємствах енергетики (зокрема атомних станціях) стримується низкою невирішених науково-технічних бар'єрів. Ці бар'єри лежать на перетині комп'ютерної графіки, розподілених систем та інформаційної безпеки.

1.3.1. Складнощі інтеграції інженерних даних та запобігання витоку пропрієтарної інформації

Основою достовірного інтерактивного засобу навчання з ремонту насосів є 3D-модель обладнання. На етапі проєктування та виробництва використовуються системи автоматизованого проєктування (CAD), такі як SolidWorks, Siemens NX або AutoCAD. Ці моделі містять вичерпну інформацію про виріб: точну геометрію внутрішніх поверхонь, допуски, специфікації матеріалів.

При перенесенні цих даних у середовище візуалізації (WebGL/VR) виникає два взаємопов'язані виклики:

- 1) **Надлишковість даних:** CAD-моделі є параметричними і містять надмірну деталізацію (наприклад, різьбу на кожному болті), що призводить до мільйонів полігонів при теселяції, створюючи критичні перешкоди для перенесення інженерних BIM/CAD-моделей у віртуальні середовища [Ferretti et al., 2025]. Це унеможлиблює рендеринг у реальному часі, особливо у веб-браузерах на мобільних пристроях.
- 2) **Загроза крадіжки даних:** Передача оригінальної або навіть спрощеної геометрії на клієнтський пристрій створює ризики реверс-інжинірингу та крадіжки даних (Data Theft), що є критичною вразливістю сучасного промислового метавсесвіту [Alcaraz, Lopez, 2022; Wang Y. et al., 2023; Odeh, Yang, 2024; Tantawi et al., 2025]. Виробники обладнання часто відмовляються надавати конструкторську документацію розробникам навчальних засобів, побоюючись витоку комерційної таємниці [Шевченко, 2024а; Lorenz et al., 2016].

Існуючі підходи часто базуються на вбудовуванні цифрових водяних знаків [Hamidi et al., 2019; Peng et al., 2026] або балансуванні точності через класичну децимацію [Tang, Gu, 2010; Moskvina et al., 2026]. Однак вони виконують лише «сліпе» геометричне спрощення сітки і не враховують логіку навчального сценарію (з якими конкретно вузлами взаємодіятиме користувач), що у підсумку змушує розробників вдаватися до дорогавартісної та тривалої ручної обробки вихідної геометрії. Необхідний метод, який би дозволяв автоматизовано перетворювати «інженерну модель» на «навчальну модель», видаляючи внутрішню топологію вузлів, які не використовуються в рамках конкретного сценарію (аналогічно до підходів Shrinkwrap-моделювання [Rosati et al., 2024]), та залишаючи лише необхідні інтерфейси взаємодії.

1.3.2. Обмеження автоматизації та інструментарію візуального проєктування сценаріїв

Традиційний процес створення інтерактивного сценарію (наприклад, «Пуск насосного агрегату») вимагає написання програмного коду на мовах високого рівня (C#, C++, JavaScript). Це створює бар'єр між експертом предметної області (інструктором, технологом) та кінцевим продуктом.

Інструктор знає, як має працювати обладнання, але не вміє програмувати. *Програміст* вміє кодувати, але не розуміє фізики процесів в енергетиці. Цей парадокс, детально описаний у дослідженнях наукової школи ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова [Абрамович, Самойлов, 2021], є головною причиною затягування розробки та втрати експертності. Він історично супроводжує розробку інтерактивних навчальних засобів [Hussain et al., 2010] і досі залишається актуальним. І якщо для 2D-схем його вдалося частково вирішити імітаційно-технологічними методами конструювання [Абрамович, Самойлов, 2021], то для 3D-середовищ він залишається відкритим, вимагаючи впровадження інструментів на базі штучного інтелекту [Trabelsi et al., 2026] та спільних підходів до дизайну [Bisson et al., 2025].

Спроби адаптувати загальноприйняті програмно-інженерні нотації (зокрема, UML у частині діаграм активностей чи станів) або традиційні специфікації електронного навчання (SCORM, IMS Learning Design) для створення інтерактивних навчальних сценаріїв стикаються з суттєвими обмеженнями. Моделі UML орієнтовані на документування коду і не володіють строгою семантикою виконання для аналізу паралельних процесів реального часу, тоді як освітні LMS-стандарти управляють процесом навчання лише на макрорівні, не маючи математичного рушія для симуляції фізики та взаємодій у тривимірному просторі.

Це призводить до тривалих ітерацій розробки, помилок у логіці навчального засобу та високої вартості внесення змін. Як засвідчує

комплексний огляд [Xiao et al., 2025], методології проєктування та інструментарій розробки для промислових 3D-середовищ суттєво відстають від апаратних можливостей. Тому актуальним є завдання розробки спеціалізованих візуальних редакторів («No-Code»). Для цього необхідний перехід до компонентно-орієнтованої архітектури (Data-Driven Design), яка чітко відокремить абстрактні шаблони 3D-об'єктів від динамічної логіки виконання сценарію. Це дозволить експертам предметної області візуально формувати граф переходів, оперуючи зрозумілими сутностями («відкрити засувку», «перевірити тиск») [Craven et al., 2025]. Водночас, делегування логіки безпосередньо графу сценарію створює нову вимогу: необхідність архітектурного захисту базових фізичних властивостей та ієрархічних зв'язків унаслідкуваних 3D-моделей від непередбачуваних чи суперечливих модифікацій під час безпосереднього виконання (Runtime) складної кооперативної симуляції. Відсутність такого захисту є причиною деструктивних каскадних збоїв, коли зміна однієї властивості руйнує логіку всього графа.

1.3.3. Обмеження мережевої синхронізації у багатокористувацьких сценаріях

Специфіка роботи в енергетиці передбачає командну взаємодію (наприклад, оператор на щиті управління та обхідник у машинному залі) [Шевченко, 2025d]. Необхідність використання 3D-моделей у VR для віддаленої спільної розробки та вивчення процедур технічного обслуговування підтверджується багатьма дослідженнями [Burova et al., 2022]. Реалізація багатокористувацького режиму (Multiplayer) у веб-середовищі стикається з обмеженнями каналів зв'язку, що є класичним вузьким місцем архітектури розподілених систем [Carlsson, Hagsand, 1993; Macedonia et al., 1994]. Незважаючи на активний розвиток цифрових двійників, більшості з них досі бракує повноцінних багатокористувацьких

можливостей для проведення імерсивного спільного навчання [Solanes et al., 2026].

Пропускна здатність та латентність: Стандартні підходи до синхронізації, прийняті в індустрії розваг (надсилення координат об'єктів 30-60 разів на секунду), є неприйнятними для мобільних мереж (3G/Edge), які часто є єдиним каналом зв'язку на віддалених об'єктах. Як підтверджують емпіричні дослідження [Becher et al., 2020], наявність мережових затримок (latency) в імерсивних багатокористувацьких середовищах має прямий негативний вплив на продуктивність спільної роботи. Це призводить до «лагів», стрибків об'єктів та розсинхронізації дій користувачів [Lindblom et al., 2021], що прямо руйнує відчуття втілення (embodiment) у віртуальному просторі [Тао et al., 2023].

Синхронізація фізичних процесів: На відміну від ігор, у технічних симуляторах важливо синхронізувати не лише положення, а й параметри фізичних процесів (частоту вібрації, тиск, температуру). Візуалізація цих процесів (наприклад, вібрація стрілки манометра) вимагає передачі великих масивів даних при класичному підході. Більше того, класичні алгоритми (зокрема, стандарту DIS IEEE 1278.1), що спираються на поліноміальну екстраполяцію (Dead Reckoning), виявляються вкрай неефективними при відтворенні високочастотних осциляцій. В умовах мережової затримки вони зумовлюють кумулятивне зростання помилок та втрату фазової узгодженості між клієнтами.

Як доведено у [Peitso, Brutzman, 2020], подолання мережових затримок (lag) у розподілених фізичних симуляціях вимагає відходу від стандартних методів та переходу до архітектур, що підтримують декларативні протоколи представлення фізики. Тому існує потреба в розробці нових методів синхронізації, які базуються на передачі не «сирих» координат, а кінематичних параметрів фізичних законів, покладаючи завдання реконструкції візуалізації на клієнтський пристрій. Це дозволить

суттєво знизити трафік та забезпечити плавність роботи навіть у нестабільних мережах.

1.4. Екологічна та інфраструктурна ефективність цифровізації процесів підготовки персоналу («Green Computing»)

В умовах глобальних кліматичних змін та переходу до «зеленої» економіки, вимоги до енергоефективності та екологічності висуваються не лише до промислового обладнання, а й до інформаційних систем, що забезпечують його експлуатацію. Це є ключовим пріоритетом концепції «Green IoT» в рамках Індустрії 5.0 [Fraga-Lamas et al., 2021]. Застосування інтерактивних навчальних систем слід розглядати крізь призму парадигми екологічних обчислень («Green Computing»), яка передбачає оптимізацію інфраструктурних навантажень, мінімізацію споживання ресурсів та утворення відходів [Shevchenko T. et al., 2024; Al-kfairy, 2025].

Аналіз життєвого циклу засобів підготовки персоналу дозволяє виділити три ключові аспекти, де застосування запропонованих ІТ-рішень дає суттєвий екологічний ефект.

1) Дематеріалізація навчально-тренувальної бази. Традиційні навчальні центри використовують фізичні макети та розрізні моделі реального обладнання (насосів, турбін, запірної арматури). Виробництво цих макетів вимагає значних витрат металу, енергії та мастильних матеріалів. Більше того, моральне застарівання обладнання призводить до необхідності утилізації фізичних стендів, що є складним технологічним процесом.

Перехід до віртуальних 3D-моделей забезпечує повну дематеріалізацію засобів навчання. Створення цифрового двійника не потребує витрат матеріальних ресурсів, а його тиражування (копіювання ПЗ) має мінімальний операційний вуглецевий слід у порівнянні з виробництвом фізичної копії агрегату. Варто зазначити, що дане

дослідження фокусується виключно на оптимізації операційного вуглецевого сліду (Operational Carbon) архітектур, залишаючи за дужками питання втіленого вуглецю (Embodied Carbon) апаратного забезпечення.

2) Зниження вуглецевого сліду логістичних процесів.

Централізована модель навчання вимагає фізичної присутності персоналу в навчальних центрах, що пов'язано з регулярними відрядженнями та використанням транспорту. Впровадження дистанційних веб-орієнтованих навчальних систем дозволяє проводити навчання безпосередньо на робочих місцях або вдома. Це суттєво зменшує транспортні викиди CO₂, що є важливим показником оптимізації ресурсоспоживання підприємств енергетики.

3) Енергоефективність архітектурних рішень програмного забезпечення (екологічних обчислень – Green Computing).

Окремої уваги заслуговує порівняльний аналіз енергоспоживання різних підходів до реалізації 3D-навчальних систем.

Підхід на основі хмарного рендерингу (Cloud Rendering / Pixel Streaming): Передбачає виконання всіх графічних обчислень на потужних серверах (GPU-фермах) і передачу відеопотоку користувачеві. Цей підхід генерує високе навантаження на дата-центри, які є значними споживачами електроенергії, а також створює великий обсяг мережевого трафіку, що потребує енергоємного мережевого обладнання.

Запропонований підхід на основі клієнтського рендерингу (WebGL/Client-side): Передбачає передачу лише оптимізованих математичних моделей та параметрів станів (згідно з розробленим методом), тоді як візуалізація виконується на кінцевому пристрої користувача (планшет, ноутбук). Сучасні мобільні процесори (ARM-архітектура) мають значно вищу енергоефективність на ват продуктивності порівняно з серверними рішеннями.

Таким чином, вибір архітектури системи навчання є не лише технічним, а й екологічним рішенням. Оптимізація обсягів передаваних даних та перенесення обчислень на клієнтські пристрої дозволяє знизити сумарне енергоспоживання системи, що відповідає сучасним вимогам до «зелених» ІТ-технологій та вирішує конфлікт між вимогами ресурсоощадності і розгортанням енергоємних інфраструктур метавсесвіту [Raman et al., 2025].

1.5. Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз дозволяє виявити ключове наукове протиріччя у сфері навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій:

З одного боку, існує гостра необхідність у масовому впровадженні інтерактивних навчальних засобів, здатних забезпечити високу реалістичність, підтримку багатокористувацьких сценаріїв та віддалений доступ для забезпечення об'єктів енергетики кваліфікованими кадрами.

З іншого боку, існуючі технології створення та експлуатації таких систем характеризуються високою трудомісткістю розробки, вразливістю до витоку пропрієтарних даних та відсутністю інструментів управління когнітивним навантаженням на основі заданого рівня складності. Крім того, традиційним підходам бракує строгих формальних моделей для аналізу простору станів, що суттєво ускладнює верифікацію розроблюваних сценаріїв, включаючи виявлення тупикових ситуацій та взаємних блокувань (deadlocks). Ситуація ускладнюється нездатністю існуючих протоколів на базі поліноміальної екстраполяції забезпечити стабільну синхронізацію станів у мережах з низькою пропускнуою здатністю, а також вразливістю монолітних платформ до каскадних збоїв при оновленнях.

Вирішення цього наукового завдання потребує створення нових моделей та методів побудови навчальних сценаріїв, їх верифікації та візуалізації при створенні навчального контенту та його відтворення.

Метою дослідження є розроблення інформаційної технології, що одночасно забезпечує створення, верифікацію, візуалізацію та синхронне відтворення для всіх учасників інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей для навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій.

На основі проведеного аналізу встановлено, що для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити структуру та спосіб представлення навчальних 3D-моделей із механізмом фіксації залежностей й ієрархічного блокування.
2. Розробити модель структури сценарію на базі ієрархічних мереж Петрі, що забезпечить детермінованість логіки та автоматизоване виявлення тупикових ситуацій і взаємних блокувань.
3. Розвинути метод обробки та представлення інженерних 3D-даних шляхом автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, які не задіяні у конкретному сценарії, для зниження навантаження на систему візуалізації.
4. Розробити метод управління обсягом інформації на сцені для забезпечення прийняттого когнітивного навантаження на користувача відповідно до заданого рівня складності навчання.
5. Розробити аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів для розподіленої мережевої синхронізації, що забезпечує збереження фазової узгодженості в умовах флуктуацій мережевої затримки.
6. Здійснити програмну реалізацію розроблених моделей і методів у вигляді функціональних модулів та апробувати їх.

1.6. Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз відкритих джерел показав, що в умовах зростання складності енергетичного обладнання критичним фактором стає

рівень підготовки персоналу. Традиційні (пасивні) методи навчання не забезпечують формування необхідних навичок дій при виконанні ремонтних робіт, а фізичні тренажери є економічно неефективними та складними у масштабуванні.

2. На основі проведеного порівняльного аналізу засобів підготовки визначено, що саме інтерактивні 3D-симулятори є найбільш ефективним інструментом, здатним формувати просторове розуміння та сенсомоторні навички без ризиків для реального обладнання. Однак їх широке застосування стримується відсутністю спеціалізованих інструментів для швидкого створення навчального контенту експертами предметної області без залучення програмістів, що особливо гостро відчувається на тлі глобального дефіциту кваліфікованих кадрів [Tantawi et al., 2025]. Також існуючі підходи не враховують теорію когнітивного навантаження (Cognitive Load Theory), що унеможлиблює адаптацію рівня складності сценарію до пропускної здатності робочої пам'яті учня. Крім того, відсутність архітектурних механізмів фіксації залежностей у більшості платформ може призводити до каскадного руйнування навчальних сценаріїв при оновленнях будь-яких їх компонентів: 3D-моделей, властивостей, блоків коду та ін., що підтверджується гострою потребою у переході до гнучких мікросервісних архітектур та версіонованих робочих процесів [Xiao et al., 2025; Mariscal-Melgar, 2025].
3. Визначено, що використання наддеталізованих промислових CAD-моделей призводить до перевантаження систем візуалізації. Існуючі базові алгоритми оптимізації 3D-моделей (децимації) виконують лише «сліпе» геометричне спрощення сітки, не враховуючи алгоритмічні зв'язки між геометрією та логікою навчального сценарію (а саме те, з якими конкретно вузлами взаємодіятиме користувач, а які залишаться нерозбірними). Збереження зайвої

внутрішньої топології агрегату в пам'яті клієнтського пристрою ускладнює зниження обчислювального навантаження на графічний конвеєр, а також, на практиці, створює алгоритмічну вразливість до несанкціонованого копіювання (реверс-інжинірингу) пропрієтарних інженерних креслень виробників.

4. Встановлено, що класичні протоколи синхронізації, які базуються на поліноміальній екстраполяції координат (Dead Reckoning), виявляються непридатними при відтворенні високочастотних осциляцій (вібрацій) зазнають кумулятивного зростання помилок в умовах нестабільної латентності мобільних мереж (3G/Edge). Обґрунтовано потребу у розробці спеціалізованого аналітико-параметричного методу реплікації станів, який забезпечить збереження фазової узгодженості та мінімізацію трафіку при кооперативному навчанні.
5. Обґрунтовано доцільність застосування архітектури з клієнтським рендерингом (WebGL) як найбільш оптимізованого та ресурсощадного IT-рішення. На відміну від технологій хмарного стрімінгу відео (Pixel Streaming), які генерують надмірне навантаження на серверні графічні потужності та магістральні канали зв'язку, перенесення обчислень на кінцеві пристрої дозволяє уникнути інфраструктурних вузьких місць. Такий підхід повністю відповідає сучасній парадигмі екологічних обчислень («Green Computing»), суттєво знижуючи загальне енергоспоживання програмного комплексу та, як наслідок, його вуглецевий слід.

Таким чином, наведене підтверджує актуальність завдання із розроблення інформаційної технології, що одночасно забезпечує створення, верифікацію, візуалізацію та синхронне відтворення для всіх учасників інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей для навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОБУДОВИ ІНТЕРАКТИВНИХ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ 3D- МОДЕЛЕЙ

2.1. Інформаційна модель віртуальних навчальних 3D-моделей та формалізація процесу трансформації інженерних даних

Створення віртуального навчального засобу базується на використанні цифрових копій реального обладнання. Проте пряме використання інженерних моделей (CAD-даних), призначених для виробництва, у навчальних системах реального часу (Real-time rendering) є неможливим через надлишкову геометричну складність та високі вимоги до захисту пропрієтарних інженерних даних. Необхідна формальна модель, яка описує перетворення «виробничого об'єкта» у «навчальний об'єкт».

2.1.1. Теоретико-множинна модель навчального об'єкта та парадигма «Шаблон-Екземпляр»

Перехід від традиційної комп'ютерної графіки до систем промислового імерсивного навчання вимагає концептуального переосмислення базових сутностей. З огляду на це, поняття «3D-модель» формалізується як комплексний навчальний об'єкт O (віртуальний аналог обладнання), який не є простою, жорстко запрограмованою сутністю.

Формально базовий шаблон навчального об'єкта O (без урахування системних ідентифікаторів баз даних) визначається як кортеж компонентів:

$$O = \langle ID_{parent}, G, St, \delta, K \rangle$$

де $ID_{parent} = \langle UUID, ver \rangle$ – глобальний ідентифікатор, що містить унікальний номер батьківського об'єкта та індекс його версії (ver) для забезпечення механізму фіксації залежностей.

Решта складових об'єкта є його власними властивостями, що перевизначають властивості батьківського об'єкта, та є наступними:

1) Геометрична складова (G). Виконує роль вказівника на зовнішній репозиторій візуальних активів (Asset Store). Містить посилання на оптимізоване візуальне представлення об'єкта (полігональні сітки – Meshes, та текстурні карти). На відміну від CAD-моделей, що використовують параметричний опис (B-Rep, NURBS), навчальна модель використовує полігональне представлення.

Для стабільного виконання фізичних симуляцій у реальному часі критично важливою є оптимізація вихідної геометрії [Xu et al., 2026]. Оптимізація цієї складової описана далі у п. 2.1.2.

2) Властивості та стани (St). Комплексний ієрархічний контейнер змінних об'єкта, що поділяється на логічні підрозділи:

- *Метадані:* Назва; опис; масив посилань на базу знань навчального комплексу (Tech library). Це дозволяє динамічно підвантажувати мультимедійний контент (відеоматеріали, PDF-інструкції, креслення та ін.) безпосередньо під час взаємодії з об'єктом у VR-середовищі.
- *Фізичні властивості:* Маса; масив посилань на базу матеріалів (Material Library) із зазначенням відсоткового вмісту кожного матеріалу, що входить у склад цього об'єкта (наприклад, сталь – 80%, пластик – 20%). Це дозволяє враховувати ці дані у фізичних симуляціях (наприклад маса – для розрахунку інерції, кінематики тощо) та екологічних розрахунках сценарію (вуглецевий слід).
- *Локальні логічні стани:* Динамічні прапорці статусу (наприклад, highlighted («підсвічений»), dragged («об'єкт переміщують»), hidden («захований»)) та інші змінні, що потрібні для функціонування даного об'єкту в межах сценаріїв.
- *Дозволи (Permissions):* Множина дозволених базових дій з об'єктом. Фактично – набір тих же самих змінних. Підрозділ введено для зберігання прапорців, які сигналізують зовнішнім функціям, які дії можуть бути застосовані до об'єкта (наприклад, Click, Drag, Hover,

Rotate, Inspect, Explode і т.д.) Це дозволяє системі розрізняти об'єкти: наприклад, маховик засувки можна «крутити» (Rotate), а корпус насоса – лише «оглядати» (Inspect); дія Explode відповідає за рознесення деталей для огляду.

Структуру підрозділів саме у цьому компоненті дозволяється змінювати під час створення/редагування сценарію. Зазначена вище структура компонента *St* є базовою за замовчуванням та може змінюватися у шаблонах згідно потреб авторів сценаріїв й мати теоретично необмежену кількість вкладених підрозділів.

3) Функції переходів та реакцій (δ). Описує інтерфейс взаємодії об'єкта із рештою сцени. Замість кодування дій через функції ззовні об'єкта, можна кодувати взаємодію із «зовнішнім світом» із середини об'єкта за принципом подійно-орієнтованої архітектури. Цей розділ містить умови спрацьовування (наприклад «при наведенні курсора миші», або «при натисненні кнопки миші на об'єкт»), що прив'язані до конкретних блоків дій (наприклад, макроси «підсвітити об'єкт», «відтворити звук», «прикріпити до курсора») через посилання на базу універсальних дій (Action Library). Ця база є набором ізольованих інкапсульованих фрагментів логіки. Такий підхід дозволяє гнучко налаштовувати реакції об'єкта у візуальному редакторі, комбінуючи готові перевикористовувані (reusable) скрипти-команди.

4) Кінематично-структурна складова (K). Об'єднує топологію об'єкта та його кінематику у просторі, оскільки вони є математично нерозривними.

- *Структура:* Ієрархічні зв'язки (Parent/Child), що формалізуються як $S = \{P_{id}, T_{local}\}$. Тут P_{id} – ідентифікатор батьківського вузла (шаблону або екземпляра), а T_{local} – локальна матриця трансформації, що визначає просторову прив'язку відносно батьківського вузла (координати, поворот, масштаб). Завдяки такій структурі будь-яка

кінематична зміна батьківського об'єкта математично каскадується на всі дочірні. Наприклад, якщо для екземпляра «робоче колесо» визначити підпорядкування до вузла «вал двигуна», то будь-яке обертання валу автоматично викликатиме синхронне обертання робочого колеса насоса.

- *Динаміка*: Описує траєкторії руху. Для технічних вузлів рух зазвичай обмежений ступенями вільності (DoF).

$$K = \{Axis, Limits, v(t), \omega(t)\}$$

де:

- *Axis* – вектори осі руху та/або обертання;
- *Limits* – обмеження переміщення (наприклад, клапан відкривається від 0 до 250°);
- $v(t)$ – функція лінійної швидкості;
- $\omega(t)$ – функція кутової швидкості.

Для шаблону цей підрозділ зберігає стартові кінематичні налаштування (наприклад, об'єкт за замовчуванням обертається навколо осі Z). Для екземпляра – це динамічні змінні. Наприклад, при настанні події «Вибух» у сценарії, базове обертання скасовується, осі відв'язуються від батьківського вузла, і об'єкту призначається вектор вільного польоту.

Парадигма «Шаблон-Екземпляр» та механізм фіксації залежностей

Відповідно до принципів компонентно-орієнтованої архітектури, 3D-модель первинно розглядається як абстрактний шаблон (Template/Prefab).

Будь-який новий шаблон може створюватися на базі існуючого через механізм успадкування з можливістю перевизначення (overriding) окремих властивостей. Для забезпечення надійності системи в архітектуру закладено принцип незмінюваного контролю версій (Immutable Version Control). Будь-

яка модифікація базового шаблону не перезаписує його, а генерує нову ітерацію (версію) в базі даних. При успадкуванні дочірній об'єкт зберігає не лише зв'язок із батьківським вузлом, але й «жорстку прив'язку» (Dependency Pinning) до його конкретної стабільної версії.

У момент інтеграції об'єкта до конкретного сценарію створюється його екземпляр (Runtime Instance), також з фіксацією на поточну версію шаблону об'єкта. Це гарантує, що непередбачені глобальні зміни в батьківських об'єктах не призведуть до каскадного руйнування вже відлагоджених сценаріїв. У разі потреби автор може вручну оновити екземпляр до актуальної версії шаблону або здійснити відкат, якщо оновлення порушило логіку. Графічне подання розробленої парадигми «Шаблон-Екземпляр» та механізму фіксації залежностей наведено на рис. 2.1.

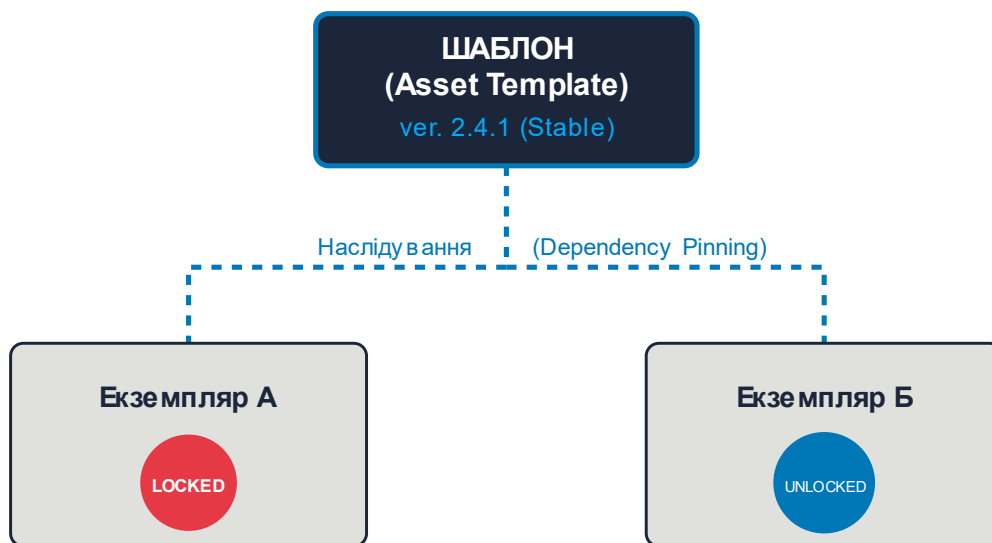


Рис. 2.1. Інформаційна модель віртуального об'єкта на базі парадигми «Шаблон-Екземпляр»

При створенні екземпляра об'єкта у конкретному сценарії властивості за замовчуванням, закладені в шаблоні, ініціалізуються як локальні змінні екземпляра, які можуть динамічно змінюватися логікою сценарію.

Створення нових шаблонів або зміна їхньої базової структури здійснюються лише під час створення/редагування сценарію, тоді як під час виконання (Runtime) це не передбачено – дозволяється лише модифікація (у тому числі видалення існуючих) та додавання нових змінних/властивостей до ієрархії існуючого екземпляра.

Механізм ієрархічного блокування (Locked Flag)

Для захисту логічної цілісності та детермінованості поведінки об'єкта під час виконання сценарію (Runtime) впроваджено механізм ієрархічного блокування. Прапорець *Locked* може бути встановлений на будь-якому рівні інформаційної моделі: на окремій змінній (властивості), на підрозділі або на об'єкті в цілому. У візуальному редакторі цей прапорець не обмежує права автора на налаштування шаблону, а слугує інструментом керування дозволами для ядра виконання (Scenario Engine).

Зміна захищеної властивості під час виконання сценарію (Runtime) неможлива без явного розблокування самої властивості та всієї ієрархії над нею. Прапорець може бути змінений як автором у редакторі, так і динамічно під час виконання сценарію. З метою запобігання людському фактору, візуальний редактор містить вбудований аналізатор, який відстежує ручне зняття прапорця *Locked* під час створення логіки сценарію та генерує попередження (Warning) для автора, якщо після введення розблокування прапорця його надалі по сценарію не повернуто у вихідний захищений стан.

Практичне застосування парадигми «Шаблон-Екземпляр»: Запропонована формалізація дозволяє суттєво скоротити час на створення та модифікацію сценаріїв. Наприклад, для об'єкта «Вал насоса» створюється єдиний шаблон із заданими кінематичними обмеженнями:

$$K_{template} = \{ Axis = (0, 0, 1), Limits = \emptyset, v(t) = 0, \omega(t) = 0 \}$$

При завантаженні сценарію створюється екземпляр цього валу. Якщо за логікою сценарію агрегат переходить у робочий режим, анімаційний рушій динамічно призначає екземпляру кутову швидкість $\omega = 3000$ об/хв і

розраховує кут повороту θ об'єкта навколо заданої осі у кожному розрахунковому кадрі:

$$\theta_{new} = \theta_{old} + \omega(t) \cdot \Delta t$$

Якщо ж у сценарії настає подія «Аварійне руйнування», логіка графа змінює стан об'єкта: відмінняє базове обертання, розриває ієрархічний зв'язок (Parent/Child) і призначає екземпляру вектор вільного польоту. При цьому сам базовий шаблон (Template) залишається незмінним.

Це позбавляє розробника необхідності створювати анімацію вручну («keyframe animation») для кожного режиму роботи, дозволяючи керувати поведінкою через зміну фізичних параметрів.

2.1.2. Метод автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів (Метод «Black Box»)

Суть методу полягає у вибіркового видаленні внутрішньої геометричної інформації залежно від функціональної значущості вузла у навчальному сценарії (тобто його фактичної участі в діях користувача, або у кінематичній дії). Оскільки логіка сценарію базується на переходах між локальними станами об'єктів (докладно описано у п. 2.2), фільтрація геометрії здійснюється на основі аналізу графа сценарію.

Нехай TR – множина всіх дозволених переходів у сценарії. Для кожного вузла O_i визначається предикат участі $Used(O_i, TR)$. Вузол не підлягає обфускації (залишається інтерактивним) у двох випадках: якщо хоча б один із його логічних станів $St(O_i)$ виступає передумовою $S_{pre}(tr)$ або наслідком $S_{post}(tr)$ для будь-якого переходу $tr \in TR$, АБО якщо об'єкт є безпосередньою ціллю будь-якої кінематичної дії (змінює своє просторове положення чи параметри K) у межах цього переходу:

$$Used(O_i, TR) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \exists tr \in TR : (St(O_i) \cap (S_{pre}(tr) \cup S_{post}(tr)) \neq \emptyset) \vee (O_i \in Target(action_{tr})) \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

де $Target(action_{tr})$ – множина об'єктів, кінематичні параметри яких (K) зазнають модифікацій або безпосередньо використовуються атрибутом дії $action$ під час виконання переходу tr .

На основі цього визначається функція трансформації геометрії F_{trans} :

$$G'_i = F_{trans}(G_i, Used(O_i, TR)) = \begin{cases} Simplify(G_i), & \text{якщо } Used(O_i, TR) = 1 \\ Hull(G_i), & \text{якщо } Used(O_i, TR) = 0 \end{cases}$$

де:

- $Simplify(G_i)$ – алгоритм спрощення сітки (decimation) із збереженням основної форми (для деталей, які учень буде "тримати в руках", наприклад, болти кришки).
- $Hull(G_i)$ – алгоритм побудови зовнішньої оболонки (Visual Hull / Voxelization) із повним видаленням внутрішньої структури (для вузлів, які не розбираються, наприклад, корпус електродвигуна).

Такий підхід перетворює складний інженерний вузол на «Black Box». Зовні такий об'єкт виглядає ідентично оригіналу (що важливо для візуального впізнавання), але всередині він порожній. Це суттєво зменшує кількість полігонів в геометрії 3D-моделі, що знижує навантаження на систему візуалізації.

Згідно з останніми дослідженнями у сфері безпеки цифрових двійників [Alcaraz et al., 2026], надлишкова деталізація віртуальних моделей критично розширює поверхню потенційних кібератак. Тому окрім оптимізації продуктивності, даний метод виконує функцію запобігання витоку даних [Erel-Ozcevik, Bozkaya, 2026]. Видалення внутрішньої топології вузлів реалізує принцип «необхідного знання» (Need-to-Know) на геометричному рівні: у браузер користувача завантажується лише зовнішня оболонка («Black Box»), що робить технічно неможливим відновлення точної конструкторської документації критичного обладнання з кешу браузера навіть у випадку компрометації клієнтського пристрою. Варто

зазначити обмеження даного підходу в контексті моделі загроз (Threat Modeling). Незважаючи на видалення внутрішньої топології, метод залишає доступними зовнішній силует та загальні габарити об'єкта (residual IP leakage). Однак для критичного енергетичного обладнання (наприклад, насосів) саме внутрішня топологія (гідродинамічний профіль робочих коліс та допуски) генерує найбільше обчислювальне навантаження під час рендерингу і, водночас, є найбільш критичною з точки зору захисту даних, тоді як зовнішні монтажні розміри є публічною інформацією. Такий компроміс між стійкістю до обфускації (obfuscation strength) та візуальною достовірністю для сценарію (scenario fidelity) є раціональним рішенням, що задовольняє як вимоги безпеки даних, так і дидактичні цілі навчального процесу.

2.2. Формальна модель рольової взаємодії (MPV) у віртуальному середовищі

Створення сценаріїв для колективного (кооперативного) навчання вимагає переходу від лінійних алгоритмів до моделей, здатних описувати паралельні процеси та взаємні блокування. Використання класичних математичних формалізмів (таких як чисті мережі Петрі або діаграми діяльності UML) у їхньому первісному вигляді є занадто складним та низькорівневим завданням для експертів предметної області без навичок програмування. Тому виникає потреба у створенні спеціалізованої моделі, яка б приховувала складний математичний апарат паралельних обчислень за зрозумілою логікою предметної області (семантикою дій).

Концепція розподілу ролей у спільних віртуальних середовищах бере початок у фундаментальних дослідженнях [Li X. et al., 2012] і еволюціонувала у методи рольової багатокористувацької співпраці [Wang J. et al., 2022]. Як доведено у [Samaniego-Franco et al., 2022], синхронна взаємодія з чітким призначенням ролей забезпечує найвищу ефективність.

Для вирішення завдання автоматизованого проєктування та верифікації сценаріїв розроблено Модель Рольової Взаємодії (МРВ) [Шевченко, 2025b], що концептуально спирається на класичні просторові моделі взаємодії [Benford, Fahlén, 1993] та сучасні дослідження соціальної синхронізації у VR [Ayache et al., 2025] і багатокористувацьких промислових додатків [Kuts et al., 2020].

2.2.1. Графова структура сценарію

Навчальний сценарій Sc пропонується розглядати як орієнтований дводольний граф (bipartite graph), що є характерним для апарату мереж Петрі. Перша множина вершин відповідає локальним логічним станам об'єктів (відповідник Позицій / Places), друга множина вершин відображає дії користувачів або системні події (відповідник Переходів / Transitions), а спрямовані дуги визначають причинно-наслідкові зв'язки між ними.

Формально сценарій визначається кортежем:

$$Sc = \langle R, ST, TR, Inv, L, M_{init}, M_{target} \rangle$$

де:

- $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ – скінченна множина ролей учасників (наприклад, r_1 – «Майстер», r_2 – «Слюсар», r_3 – «Оператор»). Кожен клієнтський пристрій у системі асоціюється з однією з ролей.
- $ST = \{s_0, \dots, s_n\}$ – скінченна множина всіх можливих локальних логічних станів (відповідник Позицій / Places у мережах Петрі) для всіх об'єктів моделі O . Кожен $s_i \in ST$ описує мікро-статус конкретної деталі (наприклад, «Засувка_відкрита»).

Для запобігання явищу «вибуху простору станів» (state-space explosion) при формальній верифікації, глобальний стан системи у будь-який момент часу описується не повним перебором усього середовища, а динамічним Маркуванням $M \subset ST$. Маркування є

множиною (вектором) лише тих локальних станів s_i , які є функціонально активними на поточному етапі (містять токен).

- TR – множина переходів (дій). У паралельному середовищі перехід tr спрацьовує локально, змінюючи лише стани об'єктів, залучених у дану дію. Оскільки локальний стан деталі є булевим (наприклад, деталь або змонтована, або ні), модель функціонує за правилами 1-безпечних мереж Петрі (1-safe Petri nets), де ємність кожної позиції дорівнює 1. Перехід характеризується атрибутами:

$$tr = \langle S_{pre}, S_{post}, r_{actor}, action, condition \rangle$$

де:

- $S_{pre} \subset ST$ – підмножина необхідних локальних станів-передумов (preconditions), при наявності яких перехід стає дозволеним;
- $S_{post} \subset ST$ – підмножина нових локальних станів (postconditions), у які переходять об'єкти після виконання дії;
- $r_{actor} \in R$ – роль, яка виконує дію;
- $action$ – ідентифікатор або тип цільової дії (наприклад, маніпуляція з кінематикою об'єкта, активація інтерфейсу тощо);
- $condition$ – логічна умова доступності переходу.

Для окремих типів атрибуту $condition$, пов'язаних із позиціонуванням у просторі об'єктів, вводиться контекстний параметр валідації точності позиціювання Val та для реалізації адаптивності сценарію до встановленого рівня складності (Новачок/Експерт) він може мати окремі значення під кожен такий рівень.

Параметр валідації Val формалізується як кортеж:

$$Val = \langle P_{target}, q_{target}, Tol(L) \rangle$$

де P_{target} – вектор цільової позиції в 3D-просторі; q_{target} – одиничний кватерніон цільової орієнтації; L – поточний рівень

складності сценарію. Функція толерантності $Tol(L)$ визначає допустимі відхилення за відстанню (Δd) та кутом ($\Delta \alpha$):

$$Tol(L) = \begin{cases} \{\infty, \infty\}, & \text{якщо } L = Demo(\text{авто-збирання}) \\ \{0.5m, 45^\circ\}, & \text{якщо } L = Basic(\text{навчання}) \\ \{0.01m, 5^\circ\}, & \text{якщо } L = Expert(\text{існум}) \end{cases}$$

Умова успішного виконання просторової дії (Actionmount) розраховується рушієм як:

$$Success = \left(\|P_{user} - P_{target}\| \leq \Delta d \right) \wedge \left(2 \arccos(|q_{user} \cdot q_{target}^*|) \leq \Delta \alpha \right)$$

де q_{user} та q_{target} – одиничні кватерніони, що описують орієнтацію об'єктів; q_{target}^* – спряжений кватерніон цільової орієнтації; а $\|P_{user} - P_{target}\|$ – евклідова норма (відстань) між векторами позицій.

Введення компонента *Val* дозволяє використовувати одну й ту саму 3D-модель та сценарій для різних режимів навчання: від демонстраційного (деталі самі стають на місця) до екзаменаційного (де користувач має прецизійно встановити деталь під правильним кутом).

- $Inv \subset O$ – множина предметів інвентарю (інструментів та матеріалів), доступних у межах даного сценарію;
- $L \in \{Basic, Advanced, Expert\}$ – базовий рівень складності сценарію;
- $M_{init} \subset ST$ – початкове маркування (підмножина локальних станів, активних на початку сценарію);
- $M_{target} \subset ST$ – цільове маркування (підмножина локальних станів, досягнення яких означає успішне завершення сценарію).

Варто зазначити, що запропонована графова структура сценарію Sc є ізоморфною підкласу ієрархічних кольорових мереж Петрі (HCPN) [Guigon et al., 2025]. У цій інтерпретації пасивні вузли-позиції мережі відповідають дискретним локальним станам 3D-моделей (ST), активні

вузли-переходи (TR) описують цілеспрямовані дії користувачів або системні події, а маркери (tokens) формують поточне динамічне маркування системи M (відображаючи активні в даний момент локальні стани, наявність інструментів в інвентарі та рольовий контекст). Таке відображення дозволяє використовувати математичний апарат мереж Петрі для формальної верифікації сценаріїв на відсутність тупикових ситуацій (deadlocks) та досяжність цілей, що реалізовано в алгоритмах Розділу 3. На відміну від класичних кінцевих автоматів (FSM), використання апарату мереж Петрі забезпечує підтримку справжньої паралельності дій, що дозволяє уникнути комбінаторного вибуху переплетень (interleavings) при виконанні незалежних паралельних дій, а також інкапсулювати складні частини сценарію у незалежні підграфи.

2.2.2. Формалізація точок синхронізації (Synchronization Points)

Ключовою інновацією МРВ є математична формалізація концепції емерджентних точок синхронізації. У кооперативному навчанні часто виникають ситуації, коли дія одного учасника неможлива без попередньої дії іншого (наприклад, «Слюсар не може зняти кришку, поки Оператор не скине тиск»). Це також дозволяє керувати адаптивною поведінкою при виникненні непередбачуваних подій [Bernabei, Patriarca, 2026] під керівництвом інструктора (гейммайстра) [Evain et al., 2023].

Адекватне моделювання затримок (time-out) та очікування дій інших користувачів є суттєвим викликом при розробці інтерактивних систем навчання [Абрамович, Самойлов, 2021]. В класичних лінійних сценаріях кооперація реалізується через жорсткий таймінг, що є неприйнятним для реалістичного навчання. Запропонована Модель Рольової Взаємодії (МРВ) усуває потребу у використанні штучних таймерів чи складних програмних скриптів. Завдяки дводольній топології мереж Петрі, очікування між ролями формується як емерджентна точка синхронізації, де перехід

блокується суто математично до моменту генерації необхідного токена-передумови іншим учасником.

Нехай існує перехід tr_x , який ініціюється роллю r_a . Умова його доступності $Allow(tr_x)$ цілком визначається наявністю підмножини необхідних локальних станів-передумов (S_{pre}) у поточному маркуванні системи $M_{current}$:

$$Allow(tr_x) = True \Leftrightarrow S_{pre}(tr_x) \subseteq M_{current}$$

Точка синхронізації (очікування) автоматично формується тоді, коли для виконання дії роллю r_a необхідний локальний стан об'єкта $s_k \in S_{pre}(tr_x)$, який належить до множини наслідків $S_{post}(tr_x)$ виконання дії (переходу tr_y) іншою роллю r_b . Таким чином, система не потребує введення штучних тригерів – генерація цільового локального стану (поява токена у відповідній позиції мережі Петрі) виступає природним бар'єром синхронізації.

Детальний розбір механізмів формування емерджентних точок синхронізації, вирішення проблеми конкурентного доступу до ресурсів та асиметричної міжрольової взаємодії на прикладі типових сценаріїв ремонту насосного обладнання наведено у Додатку Г.

Візуалізацію формування емерджентної точки синхронізації у термінах мереж Петрі подано на рис. 2.2.

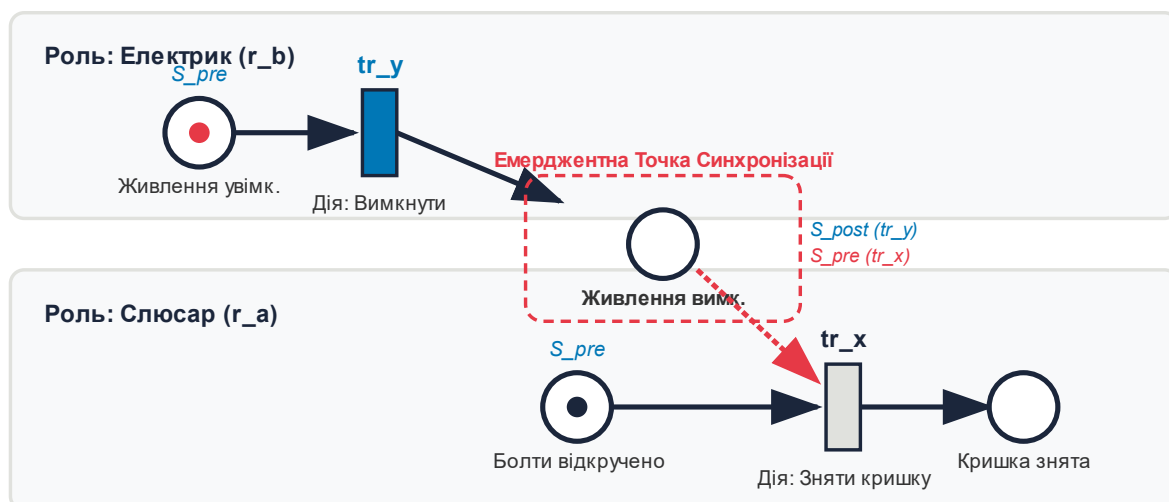


Рис. 2.2. Формування точки синхронізації на базі спільних об'єктів-передумов

У візуальному конструкторі (графі сценарію) ця емерджентна математична залежність відображається як формалізована точка синхронізації – крос-рольовий зв'язок, який наочно показує інструктору, що гілка ролі r_a заблокована до досягнення необхідного стану об'єкта діями ролі r_b . Це дозволяє без використання програмування моделювати такі типи взаємодії:

Послідовна взаємодія (Sequential Dependency): перехід для ролі r_a стає доступним лише після того, як роль r_b згенерує необхідний токен-передумову.

Спільна дія (Rendezvous / Бар'єр): перехід стає доступним лише тоді, коли свої умови (токени) згенерували обидві ролі r_a і r_b (наприклад, одночасне утримання кнопок аварійного захисту двома операторами).

2.2.3. Формалізація рольового доступу та управління ресурсами (інвентарем)

Для реалізації логіки роботи з інструментами та розмежування прав користувачів, модель МРВ використовує принципи рольового контролю доступу (RBAC).

Предмети інвентарю (інструменти, матеріали) розглядаються як підмножина об'єктів $Inv \subset O$. Взаємодія з ними описується функцією застосування, яка генерує нові локальні стани (S_{post}):

$$Apply : (O_{target} \times Inv_{item}) \rightarrow S_{post}$$

Приклад: $Apply(\text{Болт, Гайковий ключ}) \rightarrow \{\text{Болт_відкручений}\}$.

У контексті моделі маркувань, наявність інструмента в інвентарі ролі r є звичайним локальним станом (токеном). Щоб роль могла виконати дію з інструментом, цей стан має входити до множини передумов переходу: $s_{tool} \in S_{pre}(tr)$. Це автоматично запобігає колізіям конкурентного доступу до унікальних інструментів: якщо один користувач взяв ключ, токен переміщується до його локального інвентарю, і інший користувач не зможе активувати перехід, що потребує цього ключа.

Для глобального розмежування доступу на рівні системи (RBAC) кожній ролі $r \in R$ призначаються статичні підмножини видимості та інтерактивності:

$$Visible(r) \subseteq O$$

$$Interactive(r) \subseteq O$$

Це дозволяє реалізувати логіку асиметричних сценаріїв: Майстер бачить панель керування і може натискати кнопки ($O_{panel} \in Interactive(r_{master})$), а Слюсар бачить панель, але натискати не може ($O_{panel} \in Visible(r_{mechanic})$, але $O_{panel} \notin Interactive(r_{mechanic})$).

Відстеження руху токенів та валідація умов у мережі Петрі відкриває фундаментальні можливості для автоматизованого об'єктивного оцінювання успішності користувача в реальному часі. Оскільки будь-яка

невалідна дія (наприклад, спроба взаємодії з об'єктом без наявності потрібного токена-інструмента в інвентарі або порушення послідовності) математично відхиляється моделлю, система здатна класифікувати ці відхилення як помилки та автоматично нараховувати штрафні бали без написання додаткових контролюючих скриптів. Водночас критичні порушення регламенту можуть бути змодельовані як окремі дозволені переходи, що ведуть до аварійних термінальних станів. Це формує строгу алгоритмічну базу для інтеграції симулятора з високорівневими системами рейтингування персоналу.

2.2.4. Верифікація сценаріїв на наявність тупикових станів та взаємних блокувань (Deadlocks)

Використання графової моделі дозволяє застосувати методи аналізу простору станів (State Space Analysis) для автоматичної формальної перевірки якості сценарію ще до його запуску («No-code» верифікація).

Однією з найпоширеніших помилок при створенні кооперативних сценаріїв є взаємне блокування (Deadlock), коли роль *A* чекає на дію ролі *B*, а роль *B* чекає на дію ролі *A*.

У термінах запропонованої моделі МРВ, яка ізоморфна мережам Петрі, взаємне блокування виникає не просто за наявності циклічних залежностей між ролями, а тоді, коли система переходить у таке маркування, з якого неможливе виконання жодної подальшої дії.

Математично тупиковим є таке маркування $M_{deadlock}$ у просторі досяжних маркувань, яке не є цільовим, але для якого множина дозволених переходів є порожньою:

$$Deadlock(M) = \text{True} \Leftrightarrow (\forall tr \in TR : S_{pre}(tr) \not\subseteq M) \wedge (M_{target} \not\subseteq M)$$

На відміну від спрощеного пошуку циклів очікування, який дає хибні спрацьовування у системах із багатьма ресурсами, верифікація МРВ вимагає генерації простору станів (State Space Exploration). Розроблена

модель дозволяє імплементувати алгоритм побудови графа досяжності (Reachability Graph) та пошуку в ньому нецільових термінальних вузлів (маркувань, з яких не виходить жодної дуги, але які не містять M_{target}) [Razzaq, Ahmad, 2015] безпосередньо в редакторі сценаріїв. Це гарантує виявлення логічних помилок ще на етапі проєктування.

Спрощена топологія виявлення термінальних нецільових маркувань у графі досяжності наведена на рис. 2.3.

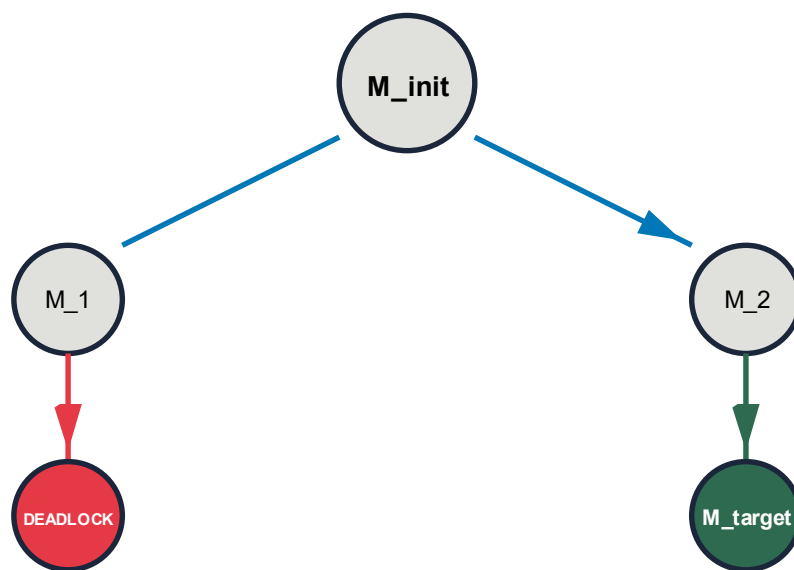


Рис. 2.3. Виявлення тупикових ситуацій у просторі досяжних маркувань

2.2.5. Порівняльний аналіз MPB з існуючими формальними моделями та стандартами (BPMN, UML, LMS)

Для доведення ефективності розробленої Моделі Рольової Взаємодії (MPB) в контексті управління інтерактивними навчальними системами, необхідно провести її порівняльний аналіз із загальноприйнятими стандартами проєктування: мовою UML, стандартами електронного навчання (LMS/SCORM) та нотацією моделювання бізнес-процесів BPMN 2.0.

MPB порівняно з UML (Unified Modeling Language). Діаграми активностей (Activity Diagrams) та діаграми станів (Statecharts) в UML є

стандартом де-факто для концептуального проєктування програмного забезпечення. Однак вони орієнтовані на відкриті реактивні системи і не володіють строгою математичною семантикою виконання (execution semantics) для аналізу динамічних процесів. Головною проблемою UML є відсутність нативної підтримки істинного паралелізму. Крім того, для математично строгого доведення відсутності тупикових ситуацій (deadlocks) UML-діаграми все одно потребують попередньої трансляції в апарат мереж Петрі, що ускладнює автоматизацію проєктування. Використання MPB усуває цей бар'єр, оскільки сценарій відпочатку будується на базі ієрархічних мереж Петрі, дозволяючи проводити верифікацію «No-Code» без додаткових трансляцій.

MPB порівняно з освітніми специфікаціями та системами LMS. Традиційні стандарти систем управління навчанням (LMS), такі як SCORM та xAPI, є виключно протоколами пакування контенту та збору статистики. Вони фіксують макро-події (час проходження, бал), але позбавлені математичного ядра для розрахунку фізичних колізій чи синхронізації паралельних дій двох механіків. Специфікація педагогічного моделювання IMS Learning Design (IMS-LD) дозволяє призначати ролі, проте стає занадто громіздкою при спробі описати варіативну логіку реального часу. MPB заповнює цю прогалину, виступаючи високопродуктивним рушієм виконання (Runtime Execution Engine) мікрорівня, який може легко інтегруватися в LMS.

MPB порівняно зі стандартом BPMN 2.0. Незважаючи на те, що нотація BPMN 2.0 є світовим стандартом моделювання бізнес-процесів, її пряме застосування для управління високодинамічними багатокористувацькими сценаріями стикається з фундаментальними архітектурними та математичними обмеженнями. Розроблена MPB перевершує або ефективно доповнює підходи BPMN за наступними ключовими критеріями:

1) *Безпечне управління фізичними ресурсами (Конкурентний доступ).*

У нотації BPMN об'єкти даних є абстрактними інформаційними сутностями, що не підходять для моделювання фізичного інвентарю. Якщо в цеху є три слюсарі, але лише два гайкові ключі, у BPMN для блокування третього учасника необхідно впроваджувати складні мережеві скрипти (mutex/locks). У MPB інвентар представлений 1-безпечними (1-safe) токенами. Механізм споживання токенів мережами Петрі природно відтворює фізичний світ: якщо токен-інструмент перейшов у локальну позицію одного користувача, дія для іншого математично блокується до моменту повернення ресурсу.

2) *Емерджентна синхронізація кооперативних дій.* У BPMN синхронізація паралельних пулів (ролей) реалізується через явну передачу повідомлень (Message Flows) та шлюзи. При складних багатоетапних ремонтах це перетворює діаграму на нечитабельний «спагеті-граф». У MPB ролі повністю ізольовані (decoupling), а синхронізація виникає емерджентно, що суттєво спрощує візуальне проєктування кооперативних механізмів.

3) *Автономна клієнтська архітектура (Client-Side Prediction).* Класичні BPMN-рушії (наприклад, Camunda) працюють на зовнішньому сервері. Це означає, що кожна зміна стану вимагає підтвердження по мережі, що призводить до затримок (input lag) та суттєво ускладнює плавну 3D-анімацію. MPB, навпаки, спроектована як легковагове математичне ядро, що працює безпосередньо всередині клієнтського 3D-застосунку. Це дозволяє клієнту локально передбачати стани, миттєво реагувати на скасування чи переривання дій без візуальних ривків, синхронізуючись із сервером у фоновому режимі.

4) *Математична верифікація та проблема мереж сбросу (Reset Nets).* Для формальної перевірки BPMN на тупики його необхідно експортувати у зовнішні академічні аналізатори (ProM, Woflan). Більше того, потужні

інструменти BPMN (наприклад, Boundary Events для скасування задач) при трансляції перетворюються на Мережі Сбросу (Reset Nets), для яких перевірка правильності (Soundness) є алгоритмічно нерозв'язною задачею. МРВ в основі є ієрархічною кольоровою мережею Петрі (HCPN), що дозволяє інтегрувати алгоритм генерації графа досяжності безпосередньо у редактор і знаходити тупики до компіляції.

5) *Динамічна когнітивна адаптація (τ - та авто-переходи)*. Для спрощення BPMN-сценарію під рівень "Новачок" необхідно створювати додаткові гілки через XOR-шлюзи та таблиці DMN, що перевантажує схему. МРВ використовує математичний поліморфізм графа: у Runtime система автоматично конвертує частину рутинних дій у мовчазні τ -переходи або системні авто-переходи без необхідності вручну створювати зайві гілки графу.

6) *Просторова кінематична валідація*. BPMN абстрагований від геометрії. У МРВ зв'язок із 3D-простором є частиною математичної моделі: умова спрацьовування переходу може оперувати контекстним параметром валідації (Val). Перехід спрацює лише тоді, коли 3D-рушій підтвердить збіг вектора цільової позиції та кватерніона орієнтації деталі в просторі.

Таким чином, індустріальні стандарти бізнес-моделювання (BPMN) залишаються доцільними для оркестрації високорівневих макропроцесів. Проте для мікрорівня виконання (Runtime Execution) у шнтерактивному 3D-просторі з урахуванням мережових затримок та конкурентного доступу до віртуальних об'єктів, використання розробленої МРВ є більш прийнятною альтернативою.

2.3. Метод управління обсягом інформації на сцені на основі теорії когнітивного навантаження

Існуючі підходи до алгоритмізації навчальних систем в енергетиці глибоко опрацювали методи оцінювання успішності та математичного

ранжирування компетенцій персоналу за результатами проходження сценаріїв [Абрамович, Самойлов, 2021]. Розроблений у даній дисертації метод управління обсягом інформації є логічним розвитком цих ідей у площину проактивної педагогіки. Система не просто дозволяє провести навчання, але й у процесі на основі заданого рівня складності динамічно оптимізує когнітивне навантаження користувача.

Як доведено у новітніх дослідженнях [Jacquemin et al., 2025], імерсивні тренування зі складання багатокomпонентного обладнання можуть супроводжуватися надмірним ментальним навантаженням, що призводить до помилок та неефективного засвоєння матеріалу. Для вирішення цієї проблеми розроблено метод управління обсягом інформації на сцені, що ґрунтується на теорії когнітивного навантаження (Cognitive Load Theory). Це дозволяє адаптувати деталізацію контенту під заданий рівень складності симуляції (наприклад, $L \in \{\text{Basic}, \text{Advanced}, \text{Expert}\}$) та обмеження пропускної здатності робочої пам'яті користувача [Hare, Tang, 2022].

Метод базується на розрахунку функції когнітивного навантаження $Load(M_{current})$ для поточного маркування системи $M_{current}$:

$$Load(M_{current}) = w_1 \cdot |O_{visible}| + w_2 \cdot |TR_{enabled}(M_{current})|$$

де $|O_{visible}|$ – кількість візуально активних 3D-об'єктів у полі зору; $|TR_{enabled}(M_{current})|$ – кількість дозволених дій (переходів), для яких у поточному маркуванні виконуються передумови ($S_{pre} \subseteq M_{current}$); w_1, w_2 – вагові коефіцієнти.

Метод базується на дотриманні граничної умови:

$$Load(M_{current}) \leq Load_{max}(L)$$

де гранично допустиме навантаження $Load_{max}$ є функцією від обраного рівня складності L (наприклад, для рівня «Basic» інструктор задає обмеження на рівні 7 елементів, тоді як для рівня «Expert» цей поріг збільшується до 10).

Метод реалізує управління цим навантаженням через три ключові механізми:

- 1) *Проактивне сповіщення при створенні сценарію (Design-time):* Інтегрований у No-Code редактор модуль верифікації аналізує простір досяжних маркувань і проактивно сигналізує інструктору про виникнення «когнітивно перевантажених» етапів. Якщо кількість одночасно доступних активних об'єктів та дій перевищує встановлену норму $Load_{max}$ для цільового рівня складності, система пропонує автору декомпонувати складний етап на дрібніші кроки.
- 2) *Автоматичне конвертування дій у τ -переходи та/або авто-переходи (Runtime):* Для збереження логічної цілісності графа та безперервності маркувань застосовується механізм динамічного перетворення типів переходів. Вводиться оператор адаптації, який перевіряє умову:

$$AutoSkip(tr, L) = True \Leftrightarrow Imp(tr) < Threshold(L)$$

Якщо атрибут логічної важливості дії $Imp(tr)$ є нижчим за поріг для поточного рівня складності (наприклад, для рівня "Новачок"), перехід автоматично конвертується у τ -перехід (мовчазний перехід, silent transition) в апараті мереж Петрі, або у автоматичний перехід (авто-перехід) – який також виконується, як і звичайний перехід, але автоматично, тобто без участі будь-якого користувача, а лише при досягненні певних умов.

Це дозволяє системі автоматизувати рутинні мікро-операції (наприклад, послідовне відкручування масиву болтів), фокусуючи увагу учня на ключових етапах, тоді як на рівні «Expert» вимагається мануальне виконання повної множини переходів TR .

Графічна візуалізація алгоритмів динамічної адаптації сценарію (зокрема, механізмів автодоповнення дій та роботи інтерфейсу,

керованого станами) в термінах мереж Петрі представлена у Додатку Г.

- 3) *Візуальне приглушення нерелевантних об'єктів (Runtime)*: Якщо поріг навантаження перевищується локально під час виконання, система застосовує алгоритм контекстного фокусування. Об'єкти, які не задіяні у поточних переходах, тимчасово переводяться у затінений стан (приглушення кольорів до фонових мінімумів, зняття відблисків). Це забезпечує динамічне зниження впливу «інформаційного шуму» на сцені, що знаходиться в полі зору користувача, не порушуючи при цьому загальної топології навчального графа.

Принцип роботи алгоритму контекстного візуального фокусування проілюстровано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Динамічне зниження візуального шуму на основі когнітивного навантаження

2.4. Аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів у розподіленому середовищі

Специфіка кооперативного навчання в енергетиці вимагає забезпечення синхронного сприйняття фізичних процесів усіма учасниками сесії. Наприклад, якщо інструктор бачить, що стрілка манометра вібрує з частотою 5 Гц (аварійний режим), учень на своєму пристрої повинен бачити те саме, і в той самий момент часу.

Традиційні методи мережевої синхронізації (State Synchronization), що використовуються в ігровій індустрії, базуються на дискретній передачі координат об'єктів із частотою оновлення сервера (Tick Rate, зазвичай 20–60 Гц). Забезпечення низької латентності залишається одним із головних технологічних викликів для 6G-мереж та промислових тренажерів [Boopathy et al., 2025]. Завдання локального рендерингу високочастотних процесів (наприклад, вібрації) успішно вирішено за допомогою вершинних шейдерів. Оскільки шейдерні деформації є суто візуальними, вони не потребують жорсткої попиксельної синхронізації між клієнтами. Тому, якщо застосувати до таких процесів класичний підхід мережевої синхронізації (який намагатиметься транслювати зміни координат кожного кадру), а також при передачі складної кінематики макропереміщень, неминуче виникають два обмеження:

- 1) **Експоненційне зростання мережевого навантаження (Надлишковий трафік):** Безперервна трансляція просторових координат або матриць трансформацій з високою частотою (Tick Rate) призводить до перевантаження каналів зв'язку.
- 2) **Візуальні артефакти та розсинхронізація (Jitter):** В умовах нестабільної латентності (Latency jitter), що є характерною для мобільних мереж, кінематика об'єктів втрачає плавність (виникає ефект «гумової стрічки» – rubber-banding), що критично знижує достовірність симуляції та загальний навчальний ефект.

Для подолання цих обмежень розроблено аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів, що базується на відмові від трансляції координат на користь передачі кінематичних параметрів. Такий підхід відповідає передовим трендам інтеграції фізичних законів у розподілені обчислення та машинне навчання [Karniadakis et al., 2021; Yuan et al., 2024].

2.4.1. Математична модель параметричної реплікації

Математичний апарат параметричної реплікації формалізує кінематику об'єкта не як масив статичних точок, а як безперервну функцію його фізичного стану.

Нехай безперервний кінематичний/просторовий стан об'єкта $\vec{X}(t)$ (його позиція, орієнтація або фаза деформації) у момент часу t визначається детермінованою функцією F , що залежить від часу та вектора фізичних параметрів $\vec{P}$ (де $\vec{P}$ – набір кінематичних характеристик, таких як частота, амплітуда вібрації тощо):

$$\vec{X}(t) = F(t, \vec{P})$$

Замість потокової передачі послідовності станів $\{\vec{X}(t_1), \vec{X}(t_2), \dots, \vec{X}(t_n)\}$, пропонується передавати кортеж події синхронізації E_{sync} лише в момент зміни параметрів $\vec{P}$:

$$E_{sync} = \langle ID_{obj}, t_{start}, \vec{P}_{new} \rangle$$

де:

- ID_{obj} – ідентифікатор об'єкта;
- t_{start} – глобальна мітка часу початку події (синхронізована через NTP);
- $\vec{P}_{new}$ – новий вектор фізичних параметрів (наприклад, для вібрації:

$\vec{P}_{new} = \{f, \vec{A}, \lambda\}$, де f – частота, $\vec{A}$ – вектор амплітуди, λ – коефіцієнт згасання).

Запропонований аналітико-параметричний метод доцільно застосовувати для параметризованих детермінованих класів динаміки: гармонічних коливань (вібрація), лінійних/афінних переміщень та квазіперіодичних рухів (обертання роторів). Для запобігання колізіям конкурентного доступу (коли кілька користувачів одночасно намагаються взаємодіяти з одним об'єктом) система використовує механізм авторитарного серверного блокування (Explicit Ownership/Locking). На відміну від складних алгоритмів типу CRDT, які забезпечують конвергенцію за рахунок значного обміну метаданими, підхід жорсткого блокування гарантує семантичну узгодженість без додаткових витрат трафіку.

2.4.2. Алгоритм клієнтської реконструкції (Predictive Reconstruction)

Клієнтський пристрій, отримавши пакет E_{sync} , не просто відображає отримані дані, а ініціює локальне обчислення стану. Поточний стан $\vec{X}_{client}$ у довільний момент часу $t > t_{start}$ розраховується методом (основаним на класичному підході зчислення координат (Dead Reckoning) [Singhal, Zyda, 1999; Liu et al., 2022]). На відміну від класичного Dead Reckoning, який використовує лінійну екстраполяцію з константною швидкістю, у запропонованому підході положення об'єкта обчислюється шляхом інтегрування нелінійної функції швидкості його руху $\vec{v}(\tau, \vec{P}_{new})$, або безпосередньо через детерміновану аналітичну функцію кінематичного стану F :

$$\vec{X}_{client}(t) = \vec{X}_{base} + \int_{t_{start}}^t \vec{v}(\tau, \vec{P}_{new}) d\tau = F(\tau, \vec{P}_{new})$$

Для детермінованого гармонічного коливання (наприклад, вібрації корпусу) цей закон вироджується у прямий аналітичний вираз:

$$\vec{X}_{client}(t) = \vec{X}_{base} + \vec{A} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t - t_{start}))$$

Фундаментальний науковий та практичний ефект розробленої математичної моделі полягає у тому, що обсяг мережевого трафіку стає повністю незалежним від складності кінематики об'єкта та частоти дискретизації (рендерингу) клієнтського пристрою. Мережеве навантаження перетворюється на функцію виключно від частоти зміни режимів роботи обладнання (ентропії системи), яка в реальних навчальних сценаріях є низькою. Це дозволяє гарантувати стабільність фізичної симуляції навіть у деградованих мережах (3G/Edge).

2.4.3. Гібридна адаптивна синхронізація та динамічне саморегулювання

Запропонований метод параметричної реплікації є найбільш доцільним для обробки детермінованих процесів (ротація, вібрація). Проте, для обробки непередбачуваних дій користувача (наприклад, безперервне переміщення деталі мишкою або дискретні кліки по інтерфейсу) аналітичне передбачення є неможливим. Для подолання цього обмеження застосовується гібридний підхід:

- 1) **Динамічна трансляція дій користувача (Adaptive Input Transmission):** Всі дії, що виконуються користувачем (як дискретні команди, так і безперервне маніпулювання об'єктами), клієнтський пристрій надсилає на сервер. Для безперервних процесів частота відправки пакетів не є жорстко заданою (наприклад, 60 Гц), а динамічно саморегулюється рушієм (наприклад, 2 рази на секунду) залежно від поточних умов мережі – пропускну здатності (Bandwidth) та затримки (RTT). При погіршенні зв'язку частота відправки автоматично знижується, а сервер компенсує втрачені або затримані стани за допомогою алгоритмів екстраполяції.
- 2) **Серверний арбітраж та розсилка станів (Server Authority & State Reconciliation):** Сервер виступає єдиним джерелом істини (Single

Source of Truth). Сервер виконує точну фізичну симуляцію світу і з певною періодичністю (яка за тими ж принципами, що у попередньому пункті, динамічно адаптується під стан мережі, наприклад, раз на 2–5 секунд) розсилає всім клієнтам інформацію про актуальний стан світу (або дельту змін з моменту останньої розсилки).

Коли клієнт отримує еталонний кінематичний стан об'єкта $\vec{X}_{server}(t)$, він порівнює його зі своєю локальною симуляцією $\vec{X}_{client}(t)$. Якщо через помилки мережі, колізії або неточність обчислень з плаваючою комою розбіжність перевищує поріг толерантності Δ_{max} :

$$NeedCorrection \Leftrightarrow \|\vec{X}_{server}(t) - \vec{X}_{client}(t)\| > \Delta_{max}$$

клієнтський рушій застосовує алгоритм лінійної інтерполяції (Lerp) для плавного приведення локального об'єкта до серверного еталону. Такий підхід гарантує абсолютну консистентність симуляції, мінімізує мережеве навантаження і унеможливорює використання невалідних даних від скомпрометованих клієнтів.

Загальну архітектуру розробленого гібридного методу мережевої реплікації порівняно з традиційним підходом зображено на рис. 2.5.

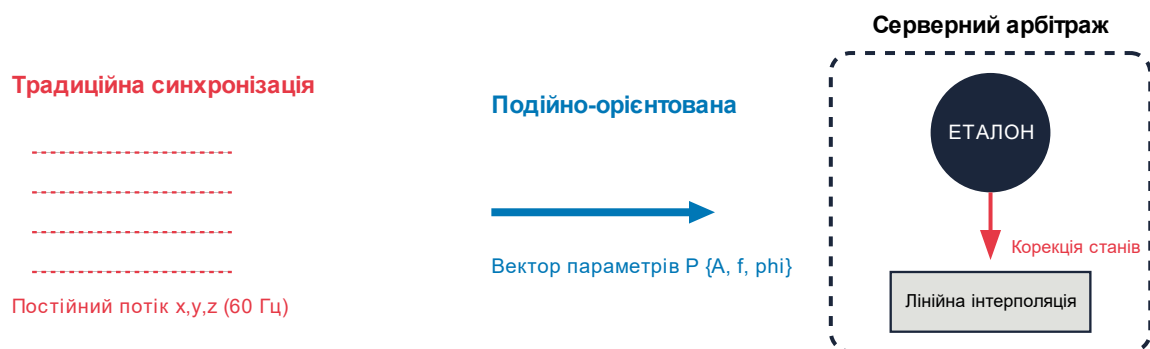


Рис. 2.5. Архітектура протоколу гібридної параметричної реплікації гармонічних станів

2.5. Концептуальна схема інформаційної технології створення та виконання інтерактивних сценаріїв

Розроблені у попередніх підрозділах математичні моделі, методи та алгоритми у своїй сукупності формують єдину інформаційну технологію. Метою цієї технології є автоматизація повного життєвого циклу створення, верифікації та виконання інтерактивних багатокористувацьких сценаріїв на основі 3D-моделей для навчання ремонтного персоналу насосів атомних станцій.

Концептуально розроблену інформаційну технологію можна представити як замкнений конвеєр обробки даних, який складається з трьох послідовних макроетапів (рис.2.6):

Етап 1. Трансформація інженерних даних. Вхідними даними для технології є важкі інженерні CAD-моделі та технічні регламенти. Процес обробки включає створення 3D-моделей віртуального об'єкта (п. 2.1.1) (або нових, або на базі існуючих шаблонів) та застосування методу автоматичного видалення їхньої внутрішньої топології (п. 2.1.2). Результатом цього етапу є формування бази оптимізованих навчальних 3D-моделей.

Етап 2. Формування логіки та верифікація сценарію. Використовуючи базу підготовлених 3D-моделей, експерт предметної області (Інструктор) створює граф навчального процесу за допомогою візуального редактора. На основі формальної Моделі Рольової Взаємодії (MPV) (п. 2.2.1) система автоматично перевіряє простір досяжних станів, виявляючи тупикові ситуації та взаємні блокування. Також розраховуються пороги когнітивного навантаження (п. 2.3). Результатом етапу є верифікований та збережений маніфест багатокористувацького сценарію.

Етап 3. Розподілене виконання та мережева синхронізація. На цьому етапі відбувається проведення багатокористувацької навчальної сесії у

віртуальному середовищі. Процес виконання включає об'єднання дій користувачів (наприклад, інструктора, електрика та слюсаря), трансляцію спектральних параметрів подій та клієнтську реконструкцію кінематики (п. 2.4). Одночасно система здійснює динамічне управління когнітивним навантаженням (авто-переходи, візуальне приглушення нерелевантних об'єктів). Результатом є стабільна та синхронна взаємодія користувачів без візуальних артефактів навіть в умовах нестабільних мобільних мереж.

Архітектурна та програмна реалізація цієї технології розглядається у наступному розділі.

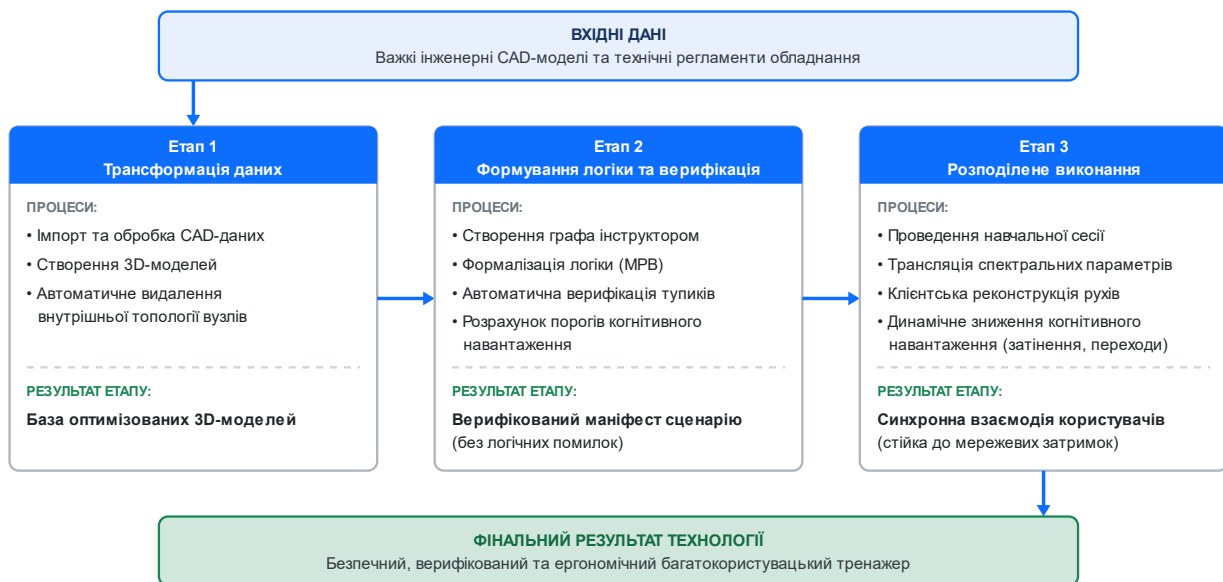


Рис. 2.6. Концептуальна схема розробленої інформаційної технології

Перспективи розвитку: Гібридне математично-імітаційне моделювання. Важливим архітектурним досягненням розробленої інформаційної моделі (п. 2.1) є інкапсуляція в структуру віртуальної 3D-моделі не лише геометрії, але й функцій реакцій (δ) та кінематичної складової (K). Такий підхід відкриває перспективний напрямок для подальших досліджень – створення гібридного методу моделювання.

Це дозволить у майбутньому об'єднати найкращі риси об'єктно-математичного моделювання (високоточний розрахунок фізики процесів, гідродинаміки, вібрацій) та розробленого сценарно-імітаційного моделювання (управління логікою через MPB).

2.6. Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено комплекс моделей та методів, що формують теоретико-методологічний базис для побудови технології інтерактивних навчальних систем для навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій:

1. Запропоновано інформаційну модель віртуальних навчальних 3D-моделей на базі парадигми «Шаблон-Екземпляр» та розширено можливості об'єктно-орієнтованого наслідування на архітектуру ієрархічних графів. Впровадження механізму фіксації залежностей (Dependency Pinning) дозволяє усунути ризик деструктивного каскадного ефекту та забезпечити ізоляцію дочірніх компонентів від змін у батьківських шаблонах, а механізм ієрархічного блокування (Locked Flag) забезпечує детермінованість логіки під час виконання (Runtime) сценаріїв.
2. Розроблено метод автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів («Black Box»). На відміну від існуючих методів класичної децимації сіток [Tang, Gu, 2010] та геометричного спрощення, метод на основі аналізу логіки сценарію дозволяє автоматично видаляти внутрішню топологію тих вузлів, які не задіяні у конкретному сценарії, залишаючи лише їхню зовнішню оболонку.
3. Розроблено формальну модель рольової взаємодії (MPB) у віртуальному середовищі. Інтеграція математичного формалізму ієрархічних мереж Петрі безпосередньо у візуальне середовище створення дозволяє забезпечити паралельність дій, уникнути

комбінаторного вибуху простору станів та інтегрувати вбудований верифікатор для автоматичного усунення тупикових ситуацій та взаємних блокувань (deadlocks) безпосередньо на етапі створення сценарію.

4. Розроблено метод управління обсягом інформації на сцені на основі математичної формалізації функції когнітивного навантаження в термінах маркувань мережі Петрі, що забезпечує утримання обсягу інформації в межах пропускної здатності робочої пам'яті користувача відповідно до заданого рівня складності симуляції за рахунок проактивної верифікації сценарію, візуального приглушення нерелевантних об'єктів та автоматичного конвертування рутинних дій у мовчазні τ -переходи та авто-переходи.
5. Вперше розроблено аналітико-параметричний метод реплікації гармонічних станів для розподіленої мережевої синхронізації. Метод базується на подієвій трансляції спектральних параметрів (частоти, амплітуди, мітки часу) замість безперервної передачі координат, що робить обсяг трафіку інваріантним до частоти коливань об'єкта. Використання глобальної часової мітки забезпечує збереження фазової узгодженості в умовах мережеских затримок, завдяки чому досягається синхронне сприйняття високочастотних динамічних процесів усіма учасниками.
6. Обґрунтовано концептуальну схему інформаційної технології, яка об'єднує розроблені методи та моделі в єдиний конвеєр обробки даних.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТВОРЕННЯ ТА ВИКОНАННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ 3D-МОДЕЛЕЙ

3.1. Загальна архітектура програмного комплексу інтерактивного навчання

Реалізація запропонованих у Розділі 2 методів та моделей здійснена у вигляді програмного комплексу, побудованого за клієнт-серверною архітектурою. При проєктуванні архітектури враховувалися специфічні вимоги до програмного забезпечення на об'єктах енергетики (АЕС), сформульовані в технічних завданнях галузі, а саме:

- 1) **Відсутність інсталяції (Zero-footprint):** Клієнтська частина має працювати у стандартному веб-браузері без встановлення плагінів чи додаткового ПЗ.
- 2) **Кросплатформність:** Підтримка роботи на ПК, планшетах та VR-гарнітурах.
- 3) **Централізоване управління:** Зберігання навчального контенту та статистики на захищеному сервері.

3.1.1. Компонентна модель системи

Архітектура комплексу базується на базовій топології, захищеній патентом України на корисну модель № 149786 [Шевченко, 2021] (рис. 3.1). На основі цієї топології розроблено розширену мікросервісну компонентну модель системи (рис. 3.2), яка складається з трьох логічних рівнів:

А) Рівень даних та серверної логіки (Data & Logic Layer / Server Side). Серверна частина забезпечує централізоване зберігання контенту, обробку мережевих подій та реалізує логіку доступу. Архітектура рівня

реалізує мікросервіси (microservices), де усі бази даних та репозиторії функціонують як складові єдиної інформаційної системи (information system) на засадах системи контролю версій (Version Control System), забезпечуючи збереження повної історії змін об'єктів для підтримки механізму фіксації залежностей (Dependency Pinning). Основні модулі:

- **Репозиторій візуальних активів (Asset Store):** Сховище оптимізованих 3D-моделей (полігональних сіток) та текстур, що формують геометричну складову (G) навчальних об'єктів.
- **База знань навчального комплексу (Tech Library):** Уніфіковане сховище додаткового мультимедійного контенту (відеоматеріали, креслення, PDF-інструкції), що формує метадані об'єкта. Для реалізації методичних вимог введено атрибут **області видимості (Visibility Scope)** для кожного матеріалу:
 - *Global Scope:* Матеріали доступні в загальному «Каталозі знань» для самостійного вивчення (наприклад, загальні технічні описи обладнання).
 - *Context/Local Scope:* Матеріали приховані із загального каталогу і доступні лише контекстно – під час взаємодії з об'єктом або проходження конкретного кроку сценарію (наприклад, відео-підказка до конкретної операції розбирання).
- **База матеріалів (Material Library):** Довідник фізико-хімічних властивостей (густина, відсотковий вміст, вуглецевий слід тощо), необхідних для розрахунку інерції, кінематики та екологічних показників симуляції.
- **База універсальних дій (Action Library):** Сховище ізольованих інкапсульованих фрагментів логіки (перевикористовуваних скриптів та макросів), що визначають функції реакцій об'єктів (δ) на події у віртуальному середовищі без необхідності жорсткого програмування.

- **Репозиторій сценаріїв:** Зберігає графи сценаріїв (маршрути навчання та ієрархічні шаблони об'єктів) у форматі JSON, розробленому на основі моделі MPB.
- **Серверний арбітр симуляції (State Arbitrator):** Відповідно до концепції «Server Authority» (п. 2.4.3), цей модуль виконує фонову фізичну симуляцію активних сцен, валідує дії клієнтів та генерує періодичні або примусові знімки стану (Snapshots) для корекції розбіжностей.
- **Модуль управління користувачами та доступом:** Реалізовано рольову модель доступу (Role-Based Access Control) [Sandhu et al., 1996], що визнається найбільш ефективним методом управління конфіденційними 3D-даними у межах співтовариств цифрових двійників (DT Communities) [Alcaraz et al., 2025].
 - *Ролі:* Гнучка рольова модель передбачає базові системні ролі (Адміністратор, Інструктор, Студент) із можливістю масштабування та створення додаткових профілів. Також на цьому рівні здійснюється мапінг (прив'язка) користувачів до симуляційних ролей MPB (наприклад, «Слюсар», «Оператор» на час проходження сценарію).
 - *Групи доступу:* Реалізовано механізм «Груп» (User Groups), що дозволяє призначати доступ до конкретних сценаріїв або агрегатів лише визначеним підрозділам (наприклад, «Група ремонту турбін»). Це забезпечує надійну ізоляцію даних у межах одного підприємства або окремого навчального потоку (групи слухачів).

Архітектурно система реалізує модель розподілених робочих місць, де кожен учасник кооперативного навчання (включаючи інструктора) працює за власним кінцевим пристроєм (персональним комп'ютером, планшетом або VR-гарнітурою) у

спільній мережі. Робоче місце інструктора (АРМ Інструктора) підтримує два режими функціонування в реальному часі:

- *Режим пасивного спостереження:* інструктор не втручається в хід симуляції, а лише візуально контролює дії бригади, відстежуючи динаміку зміни маркувань мережі Петрі та протокол помилок.
- *Режим активного заміщення:* у випадку відсутності студента на певну критичну для сценарію роль (наприклад, «Електрик»), інструктор має можливість безпосередньо зі свого робочого місця прийняти цю симуляційну роль на себе, виконуючи необхідні за регламентом перемикавання для запобігання логічному зупиненню (deadlock) сценарію для решти команди.

Б) Рівень візуального проєктування (Application Layer / Editor).

Це спеціалізований інструментарій («No-Code» редактор) для експертів предметної області, який автоматизує процес підготовки контенту та логіки:

- **Імпортер CAD:** Модуль для завантаження інженерних САПР-моделей та генерації безпечних оболонок згідно з методом автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів (п. 2.1.2).
- **Конструктор сценаріїв:** Візуальний інтерфейс для побудови графа подій, налаштування точок синхронізації та параметрів фізичної моделі, а також прив'язки матеріалів з Репозиторію до кроків сценарію.
- **Верифікатор:** Алгоритмічний блок, що виконує перевірку сценарію на цілісність, відсутність тупикових ситуацій (deadlocks) та аналізує рівень когнітивного навантаження перед фінальним збереженням.

В) Рівень представлення та виконання (Presentation Layer / Runtime Client). Клієнтський модуль ("Плеєр"), що завантажується у браузер користувача.

- **Візуалізатор (Render Engine):** Побудований на базі стандарту WebGL (наприклад, через експорт із рушія Unity або з використанням нативних веб-бібліотек типу Three.js). Відповідає за рендеринг 3D-сцени.
- **Ядро виконання (Scenario Engine):** Інтерпретатор, який зчитує JSON-файл сценарію і керує логічними станами об'єктів відповідно до дій користувача.
- **Модуль кінематики та анімації (Kinematics Controller):** Відповідає за процедурну анімацію, інтерполяцію рухів та розрахунок кінематики у реальному часі (на основі алгоритмів клієнтського передбачення з п. 2.4).
- **Модуль синхронізації (Network Client):** Забезпечує обмін даними з сервером через WebSocket на базі розробленого методу реплікації гармонічних станів. Реалізує алгоритми клієнтського передбачення (Client-Side Prediction) та плавної інтерполяції (Lerp) для компенсації мережевих затримок.

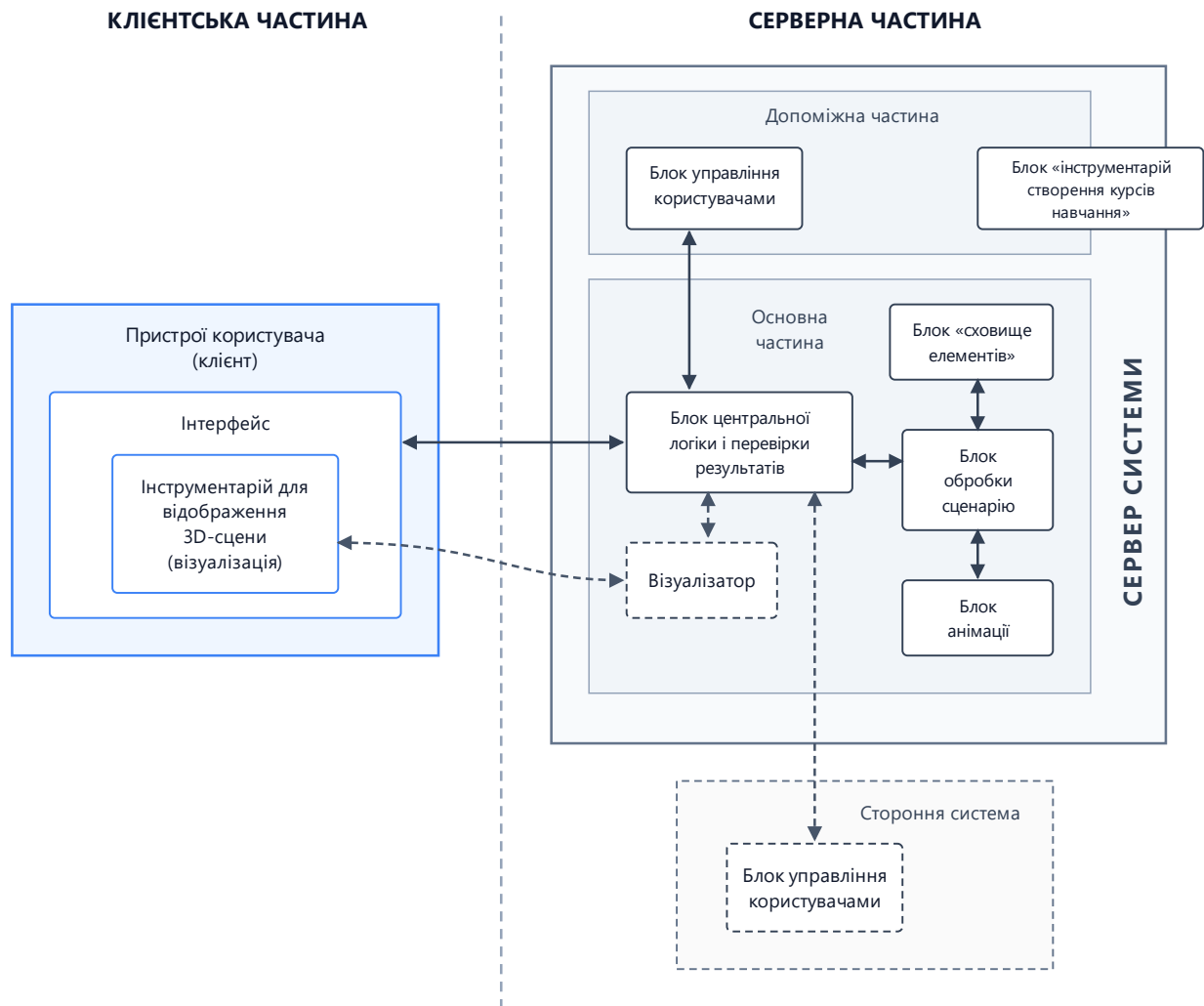


Рис. 3.1. Базова структурно-функціональна схема інтерактивної автоматизованої дистанційної навчально-тренувальної системи

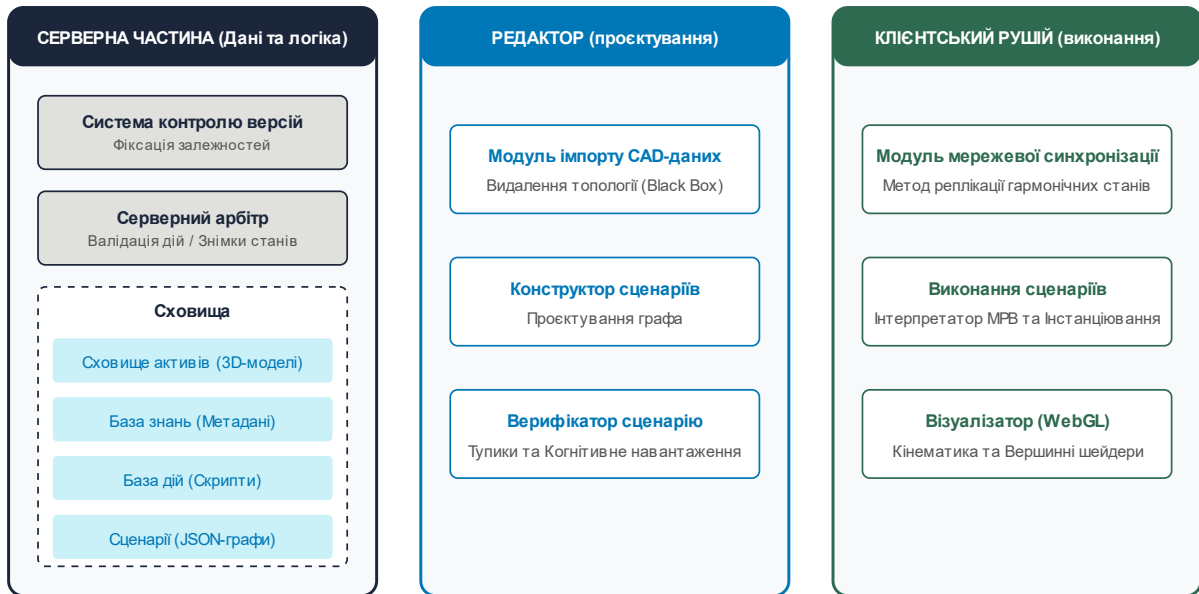


Рис. 3.2. Узагальнена компонентна мікросервісна архітектура програмного комплексу інтерактивного навчання

3.1.2. Обґрунтування архітектурних та технологічних рішень

Ефективність використання формалізмів на базі мереж Петрі для керування навчальними сценаріями у веб-середовищі (WebXR) доведена у новітніх роботах [Korečko et al., 2022]. Для реалізації клієнтської частини обрано технологію WebGL, що дозволяє використовувати апаратне прискорення графіки (GPU) безпосередньо у вікні браузера. Це забезпечує високу продуктивність візуалізації (стабільну частоту рендерингу) навіть на мобільних пристроях. Це є критичною умовою для реалізації архітектури клієнтського рендерингу, яка обґрунтована у п. 1.4 як найбільш доцільна з точки зору концепції екологічних обчислень (Green Computing).

Обмін даними між клієнтом і сервером реалізовано через протокол WebSocket. Це забезпечує двосторонній зв'язок у реальному часі з мінімальними накладними витратами (overhead). Використання надійного транспортного рівня (TCP), на якому базується WebSocket, є необхідною умовою для гарантованої доставки керівних параметрів у розробленому

методі реплікації та запобігання мережевим атакам на синхронізацію у нестабільних мережах (3G/Edge).

Дана архітектура дозволяє концептуально та фізично розділити систему на три незалежні процеси: 1) централізоване зберігання об'єктно-орієнтованих даних та серверний арбітраж симуляції; 2) візуальне проєктування логіки (виконується експертом предметної області у «No-Code» середовищі); та 3) безпосереднє виконання (інтерпретація та рендеринг у клієнтському модулі Runtime Engine). Такий трирівневий розподіл обчислювального навантаження та зон відповідальності забезпечує гнучкість, кібербезпеку та масштабованість системи підготовки персоналу.

3.2. Алгоритмічна реалізація методу автоматичного видалення внутрішньої топології віртуальних 3D-моделей

Одним із базових компонентів програмного комплексу є модуль імпорту та попередньої обробки інженерних даних, який забезпечує автоматизовану трансформацію початкових САПР-моделей у оптимізовані віртуальні навчальні об'єкти. Програмна реалізація цього модуля базується на розробленому в підрозділі 2.1 методі автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів та вирішує комплексне завдання: радикальне зниження полігонального навантаження для прискорення візуалізації в реальному часі (Real-Time Rendering) та підвищення захисту пропрієтарних інженерних даних виробників обладнання.

3.2.1. Інформаційна структура віртуального навчального об'єкта

З метою мінімізації обсягів зберігання та передачі даних між сервером та веб-клієнтом розроблено спеціалізовану ієрархічну інформаційну структуру (формат представлення знань – knowledge representation), яка серіалізується у форматі JSON. Вона є безпосередньою

програмною реалізацією теоретико-множинної моделі O , описаної в підрозділі 2.1.1, та функціонує за парадигмою «Шаблон-Екземпляр».

Ця інформаційна структура інкапсулює п'ять базових складових:

1) Глобальний ідентифікатор (ID_{parent}): Зберігає ідентифікатор *UUID* та індекс версії *ver* батьківського шаблону, забезпечуючи роботу механізму фіксації залежностей (Dependency Pinning) та успадкування.

2) Геометрія (G): Посилання на оптимізовані полігональні сітки (Meshes) у репозиторії активів.

3) Властивості та стани (St): Контейнер статичних метаданих (маса, посилання на матеріали та інструкції), а також локальних логічних станів (наприклад, *highlighted*) і дозволених афордансів.

4) Функції реакцій (δ): Словник тригерів, який замість жорсткого коду містить посилання на абстрактні логічні макроси з Базис універсальних дій (Action Library).

5) Кінематика та ієрархія (K): Структура топологічного графа сцени (Parent/Child) з відповідними матрицями локальних трансформацій та фізичними обмеженнями ступенів вільності (DoF).

Кожен елемент цієї ієрархічної структури може містити системний мета-прапорець *Locked*. Він слугує інструментом керування дозволами для ядра виконання (Scenario Engine), гарантуючи захист логічної цілісності та детермінованості поведінки об'єкта від непередбачених модифікацій під час безпосереднього виконання сценарію (Runtime). Абстрактна репрезентація цієї формалізованої структури даних наведена у Додатку В (п. В.1). Запропонована архітектура дозволяє клієнтському рушію динамічно інстанціювати об'єкти, підвантажувати лише необхідні ресурси (Lazy Loading) та безпечно перевизначати локальні змінні екземплярів без жорсткого кодування (hardcoding).

3.2.2. Алгоритм автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів

Програмна реалізація методу автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів (обґрунтованого у п. 2.1.2) виконується у вигляді конвеєра обробки даних (Data Pipeline), що автоматизує застосування функції трансформації геометрії F_{trans} . Алгоритм складається з наступних кроків:

- 1) **Імпорт та парсинг:** Система зчитує деревоподібну структуру вихідного файлу (наприклад, STEP), ідентифікуючи окремі деталі (множину V_{CAD}) та їхню топологічну ієрархію вкладеності (що ініціалізує базову складову K).
- 2) **Логіко-семантична розмітка (Оцінка предикату):** На основі побудованого графа сценарію алгоритм аналізує множину переходів TR . Для кожного вузла O_i автоматично обчислюється предикат участі $Used(O_i, TR)$. Згідно з математичною моделлю (п. 2.1.2), парсер перевіряє, чи виступають логічні стани St даного вузла передумовами (S_{pre}) або наслідками (S_{post}) для будь-якого переходу, а також чи є вузол ціллю безпосередньої кінематичної дії ($action_{tr}$). Вузли, для яких предикат повертає істину, маркуються як інтерактивні (Interactive), решта – як статичний фон (BlackBox).
- 3) **Диференційована обробка геометрії:** Відповідно до функції F_{trans} , для інтерактивних вузлів ($Used = 1$) застосовується алгоритм децимації $Simplify(G_i)$, що зменшує кількість полігонів із збереженням візуальної форми деталі.
- 4) **Генерація оболонки (Shrinkwrap-моделювання):** Для вузлів фону ($Used = 0$) застосовується процедура побудови зовнішньої оболонки $Hull(G_i)$. Алгоритм здійснює злиття сіток (MeshFusion) з подальшим відсіканням невидимих внутрішніх поверхонь (Occlusion Culling). Формується суцільна (Low-poly проху) геометрія, яка зберігає

зовнішні габарити та монтажні інтерфейси, але фізично не містить внутрішньої конструкторської інформації.

3.3. Алгоритмічне забезпечення візуального створення сценаріїв, їх верифікації та управління когнітивним навантаженням

Для подолання розриву між технічними знаннями експертів предметної області (інструкторів, технологів АЕС) та складністю програмування інтерактивних додатків, розроблено спеціалізований програмний модуль – візуальний редактор сценаріїв. Він реалізує концепцію «No-Code», дозволяючи створювати граф навчального сценарію шляхом маніпуляції візуальними блоками, які автоматично трансформуються системою у програмний код, що повністю відповідає актуальним потребам нетехнічних спеціалістів [Cassola et al., 2021; Giannini et al., 2022; Craven et al., 2025; Koteleva et al., 2025] та сприяє «демократизації» промислового дизайну [García-Molina et al., 2026].

Місце розробленої моделі MPB у класичному циклі педагогічного дизайну ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation) відображено на рис. 3.3.

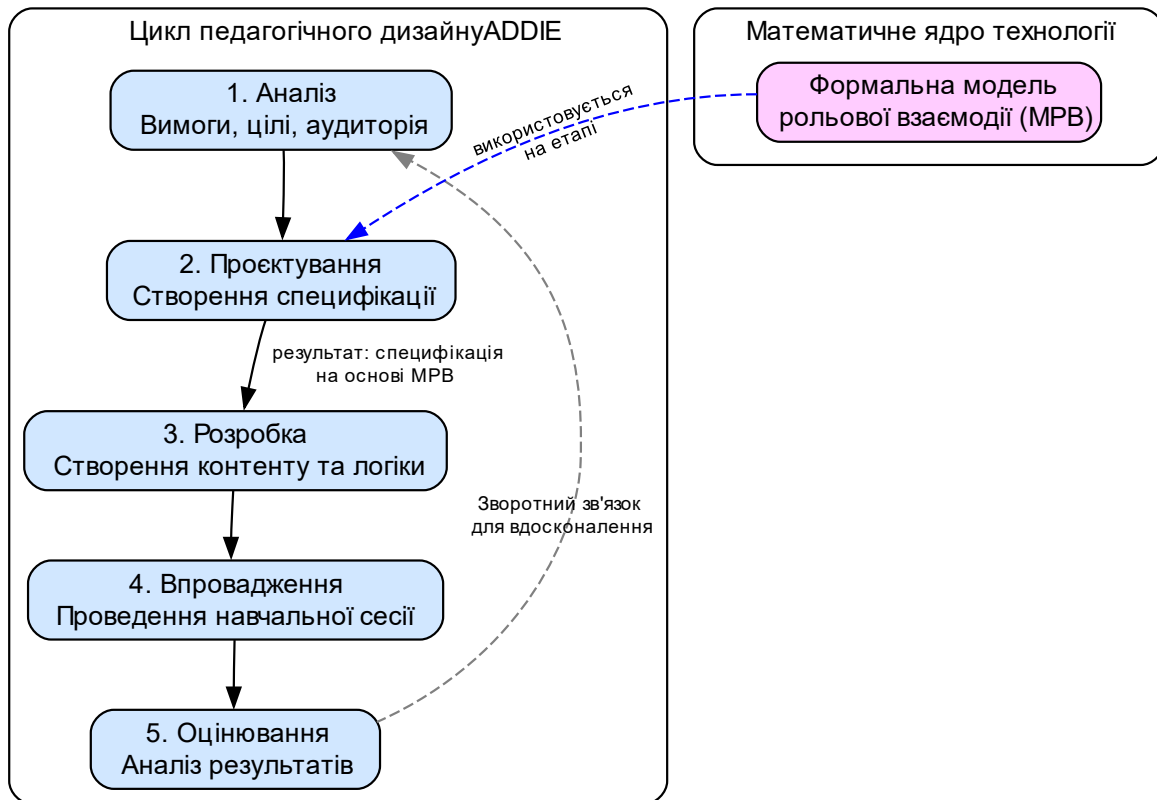


Рис. 3.3. Інтеграція моделі рольової взаємодії у життєвий цикл розробки інтерактивних навчальних систем

3.3.1. Алгоритм візуальної побудови графа подій

Процес створення сценарію в редакторі формалізовано як алгоритм побудови орієнтованого дводольного графа Sc (ізоморфного мережам Петрі), описаного в моделі MPB (п. 2.2). Застосування графо-орієнтованих мов проектування (Graph-Based Design Languages) визнано одним із найефективніших методів автоматизації інженерних робочих процесів [Borowski, Rudolph, 2026]. У візуальному інтерфейсі цей процес реалізується через пряме відображення (мапінг):

- **Вузли (Nodes)** редактора репрезентують дискретні локальні стани об'єктів ($s_i \in ST$) та причинно-наслідкові переходи ($tr \in TR$).
- **Зв'язки (Edges)** редактора репрезентують спрямовані відношення між ST та TR .

Інтерфейс базується на **подійно-орієнтованій парадигмі (Event-Driven Paradigm)**, що ідеологічно перегукується з сенсор-ефекторними моделями для віртуальних середовищ [Claude et al., 2014]. Робота користувача трансформується у структуру даних за таким алгоритмом:

- 1) **Ініціалізація локального стану (s_i):** Користувач за допомогою візуального маніпулювання 3D-об'єктом фіксує його поточні властивості у робочій області (наприклад, «Засувка закрита»). Система реєструє цей стан як вузол графа.
- 2) **Визначення передумов та тригера (S_{pre} та tr):** Користувач обирає інтерактивний елемент, визначає необхідні локальні стани-передумови (S_{pre}) для активації дії та задає її тип (наприклад, OnClick або Drag-and-Drop). Цей крок формує логіку переходу tr .
- 3) **Визначення наслідків (S_{post}):** Користувач задає цільовий стан об'єкта після виконання дії (наприклад, задає нові кінематичні обмеження чи просторову позицію) або обирає медіа-подію з Бази знань. Система реєструє ці зміни як множину наслідків S_{post} .

Такий підхід ідеологічно наслідує застосування нотації BPMN (Business Process Model and Notation) для проєктування робочих процесів в енергетиці [Самойлов et al., 2020; Плетяний et al., 2023], але на відміну від універсальних систем типу Bizagi Modeler, запропонований редактор генерує не просто схему, а готовий до виконання (executable) код конфігурації для клієнтського рушія. Це дозволяє створювати складні нелінійні сценарії, розгалуження та цикли без написання жодного рядка коду.

3.3.2. Алгоритми автоматизованої генерації логіки сценаріїв

Для мінімізації рутинної мануальної роботи інструкторів у візуальному редакторі розроблено та впроваджено алгоритми процедурної генерації переходів графа.

А) Алгоритм інверсії сценарних ланцюжків (Auto-Reverse). Технологічні процеси ремонту зазвичай симетричні: збирання агрегату є зворотною процедурою до його розбирання. Використання САД-даних для автоматизованої генерації таких послідовностей розбирання/збирання є важливим напрямком оптимізації [Kiyokawa et al., 2026]. Щоб уникнути подвійної роботи, реалізовано функцію автоматичної генерації сценарію збирання.

Нехай $P_{disassembly} = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\}$ – ланцюжок дій розбирання. Система генерує граф збирання $P_{assembly}$ шляхом інверсії напрямку ребер та застосування функції логічного заперечення до дій:

$$tr'_i = Inverse(tr_{n-i+1})$$

В термінах розробленої моделі МРВ (п. 2.2.1), функція *Inverse* виконує логічну інверсію переходу: вона міняє місцями множини передумов та наслідків ($S_{pre} \leftrightarrow S_{post}$), змінює тип цільової дії на протилежний (наприклад, $Unscrew \rightarrow Screw$, $Remove \rightarrow Install$) та реверсує вектори кінематичної анімації. Це забезпечує математично коректну генерацію зворотного шляху в графі досяжності без ручного втручання.

Б) Пули дій та процедурна анімація (Action Pools). Для обробки однотипних елементів (наприклад, масиву з 20 болтів на фланці) впроваджено механізм «Пулів дій». Інструктор виділяє групу об'єктів і застосовує шаблон дії (наприклад, «Вигвинтити»). Система автоматично генерує відповідну множину паралельних або послідовних переходів. При цьому параметри процедурної анімації розраховуються для кожного екземпляра динамічно, зчитуючи кінематичні обмеження (K) та ступені

вільності (DoF) безпосередньо з його базового шаблону (Template), що усуває необхідність ручного створення ключових кадрів чи жорсткого задання осей обертання для кожної деталі.

3.3.3. Алгоритмічна реалізація механізму точок синхронізації

Для підтримки кооперативного навчання візуальний редактор імплементує алгоритм автоматичного виведення (Inference) точок синхронізації. Відповідно до емерджентної математичної моделі (п. 2.2.2), інструктору не потрібно вручну створювати штучні тригери чи сигнали очікування між користувачами. Алгоритм працює наступним чином:

- 1) Інструктор призначає двом різним ролям (наприклад, r_a та r_b) дії, пов'язані спільним об'єктом сцени.
- 2) Редактор автоматично аналізує граф МРВ: якщо перехід для ролі r_a вимагає передумови S_{pre} , яка генерується як наслідок S_{post} з переходу ролі r_b , система самостійно ідентифікує цей вузол як Точку синхронізації (SyncPoint).
- 3) У візуальному інтерфейсі редактор автоматично малює крос-рольовий зв'язок (візуальний маркер бар'єру), сигналізуючи автору про наявність неявної залежності між учасниками.

У програмному коді (на рівні Runtime Engine) це реалізується через автоматичну генерацію «слухачів подій» (Event Listeners). Вони блокують доступ до інтерактивного об'єкта для користувача, чия роль очікує на виконання передумови (наприклад, r_a), до моменту надходження від сервера пакету даних про генерацію необхідного цільового стану іншою роллю (r_b).

3.3.4. Алгоритм автоматизованої верифікації сценаріїв (Static Analysis)

Складні розгалужені сценарії, особливо за участі кількох ролей, схильні до логічних помилок, які важко виявити вручну. На основі теоретичних досліджень [Шевченко, 2025a] розроблено та імплементовано в редактор модуль **статичного аналізу**, що є критичною вимогою для сучасних систем електронного навчання (TEL) [Iturrieta et al., 2024].

Алгоритм верифікації виконується перед збереженням сценарію і включає такі кроки (що також дозволяє передбачити можливі помилки операторів [Lestingi et al., 2024]):

- 1) **Перевірка зв'язності (Reachability Check):** Для формального доведення досяжності цільових станів застосовується метод аналізу досяжності (Reachability Analysis) [Abate et al., 2024]. Застосовується алгоритм обходу графа від початкового маркування M_{init} . Умова помилки: якщо існують цільові локальні стани з M_{target} , до яких неможливо знайти жодного валідного шляху від M_{init} , вони позначаються як «недосяжні» (Unreachable states), що свідчить про логічний розрив у сценарії.
- 2) **Виявлення тупикових ситуацій (Deadlock Detection):** Для кооперативних сценаріїв генерується простір станів (State Space Exploration) у вигляді графа досяжних маркувань на базі апарату мереж Петрі [Zhang Z. et al., 2025]. Алгоритм виявляє тупикові ситуації шляхом пошуку вузлів (маркувань) у графі досяжності, з яких не виходить жодної дуги (тобто відсутні дозволені переходи), але які при цьому не містять цільового маркування M_{target} . Це забезпечує математично строгу верифікацію, на відміну від простого пошуку циклів у графі залежностей.
- 3) **Перевірка цілісності ресурсів:** Перевіряється наявність усіх посилань на 3D-моделі, текстури та звуки, вказані у вузлах графа.

4) **Ергономічна валідація (Cognitive Load Check):** Перевірка простору досяжних маркувань на предмет перевищення гранично допустимого когнітивного навантаження $Load_{max}(L)$. У разі виявлення перевантажених етапів система генерує попередження для інструктора з рекомендацією декомпонувати крок на дрібніші операції.

Обчислювальна складність алгоритму перевірки становить $O(V_{RG} + E_{RG})$, де V_{RG} та E_{RG} – кількість вершин та ребер у згенерованому графі досяжності (Reachability Graph). Оскільки простір станів може зростати експоненційно, для багатоагрегатних сценаріїв ядро верифікатора застосовує метод редукції часткового порядку (Partial Order Reduction). Цей механізм оптимізації автоматично ігнорує ортогональні фонові дії користувача (наприклад, довільне переміщення віртуальною локацією), які не впливають на граф залежностей цільових об'єктів. Водночас, наявність жорстких крос-залежностей між агрегатами (перенесення деталей через матрицю інвентарю або очікування даних через Точки синхронізації) математично зменшує простір станів, відсікаючи неможливі гілки графа. Завдяки такій оптимізації остаточно вирішується усувається ефект «вибуху простору станів» (state-space explosion) та гарантується повнота (completeness) верифікації в реальному часі. Більше того, фокус на формальній верифікації під час проєктування (design-time verification) усуває необхідність використання ресурсоємних моніторів виконання (runtime monitors) на клієнтських пристроях, оскільки такий підхід математично гарантує відсутність тупикових ситуацій.

3.3.5. Етап компіляції та загальний конвеєр розробки

Успішне завершення етапу автоматизованої верифікації є передумовою для запуску етапу компіляції та оптимізації даних. Цей процес складається з двох стадій: компіляції візуального графа логіки у

компактний JSON-маніфест та виконання методу автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів для автоматичного вилучення незадіяної 3D-геометрії та спрощення задіяної. Скомпільований сценарний маніфест разом із оптимізованими 3D-моделями публікується в репозиторії сервера та динамічно завантажується на пристрої студентів під час завантаження сцени, що забезпечує відсутність логічних помилок та високу продуктивність візуалізації на клієнтському пристрої.

Усі описані вище етапи візуального створення (п. 3.3.1), процедурної генерації логіки (п. 3.3.2), формальної верифікації (п. 3.3.4) та компіляції об'єднуються у єдиний конвеєр розробки. Цей конвеєр дає нетехнічному експерту можливість пройти шлях від завантаження 3D-моделей до отримання безпечного, оптимізованого та математично коректного JSON-маніфесту сценарію. Узагальнену блок-схему алгоритму автоматизованого створення, верифікації та компіляції сценарію наведено на рис. 3.4.

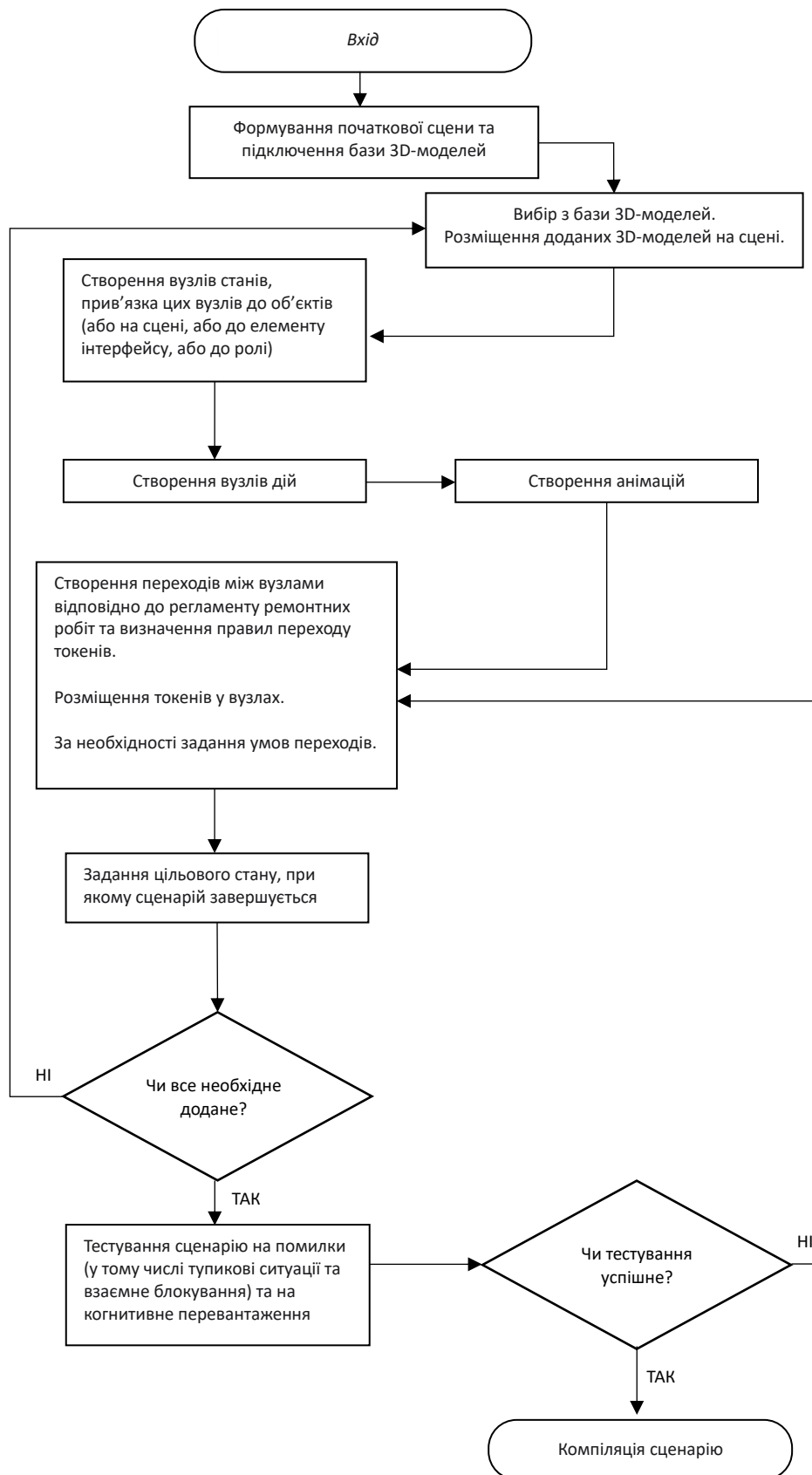


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму автоматизованого створення, верифікації та компіляції інтерактивного сценарію

3.4. Архітектура та програмна реалізація клієнтського механізму виконання сценаріїв (Runtime Engine)

Клієнтський модуль виконання (Runtime Engine) є програмним середовищем, що забезпечує завантаження та виконання скомпільованого сценарного маніфесту (приклад JSON-файлу наведено у Додатку В, п. В.4) та оптимізованих навчальних 3D-моделей. Рушій здійснює динамічне інстанціювання полегшених 3D-моделей на основі базових шаблонів, інтерпретує логіку зчитаного з сервера JSON-файлу, виконує візуалізацію сцени та обробляє дії користувача. Його архітектура побудована таким чином, щоб забезпечити автономність виконання логіки навіть при тимчасовій втраті зв'язку з сервером (за винятком моментів кооперативної синхронізації).

Повний життєвий цикл запуску та виконання розподіленого багатокористувацького сценарію в середовищі Runtime Engine реалізується через таку послідовність кроків:

- 1) Ініціалізація сесії та завантаження активів: інструктор або користувач запускають навчальну сесію, встановлюючи рівень складності, якщо це передбачено сценарієм. Це ініціює завантаження з сервера скомпільованого JSON-маніфесту сценарної логіки та інших пов'язаних із ним ресурсів.
- 2) Призначення ролей користувачам: студенти підключаються до сесії зі своїх розподілених робочих місць. Система автоматично (або вручну інструктором, або вибором самих користувачів) здійснює прив'язку кожного підключеного пристрою до конкретної симуляційної ролі (наприклад, «Слюсар» або «Електрик»).
- 3) Встановлення початкового маркування: клієнтські рушії інстанціюють 3D-моделі на сценах. Одночасно інтерпретатор

простору станів встановлює початкове маркування, призначаючи кожному віртуальному вузлу його стартовий логічний стан (наприклад, засувки закриті, кріплення закручені, живлення насосу увімкнене).

- 4) Запуск виконання та реактивний цикл: після встановлення стартових параметрів симуляція переходить в активну фазу. Система запускає автоматичний цикл виконання τ -переходів та авто-переходів для наявних передумов, після чого переходить у режим очікування дій користувачів або запланованих за сценарієм автоматичних подій, де кожна валідована подія динамічно змінює маркування графа сценарію аж до досягнення цільового маркування, при чому сценарій завершується.

3.4.1. Програмна реалізація подійно-орієнтованого інтерпретатора простору станів

Ядром клієнтського модуля є універсальний інтерпретатор графів, алгоритміка якого базується на подійно-орієнтованому обробленні логіки [Denisov et al., 2023] та семантиці мереж Петрі. На відміну від класичних кінцевих автоматів (FSM), розроблений рушій оперує динамічними маркуваннями (токенами) та підтримує адаптацію графа під заданий рівень складності навчання. Він обробляє JSON-структуру сценарію, ініціалізуючи екземпляри об'єктів (Runtime Instances) із їхніми параметрами за замовчуванням.

При реалізації клієнтського механізму виконання сценаріїв впроваджено концепцію спільного візуального простору з розділеною інтерактивною відповідальністю. Клієнтський візуалізатор на кожному індивідуальному пристрої рендерить всю тривимірну сцену повністю (кожен учасник бачить переміщення деталей та дії своїх колег у реальному

часі), що забезпечує ефект присутності. Водночас клієнтське ядро виконання сценарію жорстко фільтрує вхідні події користувача відповідно до завантажених правил МРВ.

Алгоритм роботи ядра описується наступним циклом:

- 1) **Ініціалізація:** Завантаження JSON-сценарію, генерація початкового маркування M_{init} та визначення базового рівня складності L (наприклад, "Basic", "Expert").
- 2) **Ідентифікація контексту:** Згідно з рольовою моделлю (RBAC), ядро визначає підмножини видимості та інтерактивності об'єктів для поточної ролі користувача, а також застосовує ієрархічні блокування (Locked Flag) для захищених властивостей.
- 3) **Динамічна фільтрація переходів:** Для доступних переходів $tr \in TR$ система перевіряє атрибут логічної важливості $Imp(tr)$.
 - Якщо виконується умова $AutoSkip(tr, L) = \text{True}$, перехід динамічно конвертується у τ -перехід (мовчазний перехід) або авто-перехід.
 - Система автоматично генерує токени наслідків S_{post} щойно виконуються відповідні передумови S_{pre} , оминаючи рутинні операції без участі користувача.
- 4) **Контекстне візуальне фокусування:** Ядро обчислює поточне когнітивне навантаження $Load(M_{current})$. Якщо значення перевищує поріг $Load_{max}$, рушій автоматично застосовує алгоритм затінення до об'єктів, які не входять ані до множини передумов S_{pre} , ані до множини наслідків S_{post} для поточних активних переходів.

Експериментальним шляхом було встановлено, що використання напівпрозорості (alpha-blending) для складних CAD-моделей дає зворотний ефект через проявлення прихованої внутрішньої топології. Тому система переводить нерелевантні об'єкти у стан матового силуету шляхом приглушення кольорів до фонових мінімумів (RGB

= 0.05, 0.05, 0.05), показник шорсткості (Roughness) встановлюється на максимум (1.0), а відблиски (Specular) повністю вимикаються (0.0). Такий підхід забезпечує цілеспрямоване зниження «інформаційного шуму», фокусуючи увагу учня на релевантних елементах агрегату. Результат показаний на рис.3.5.

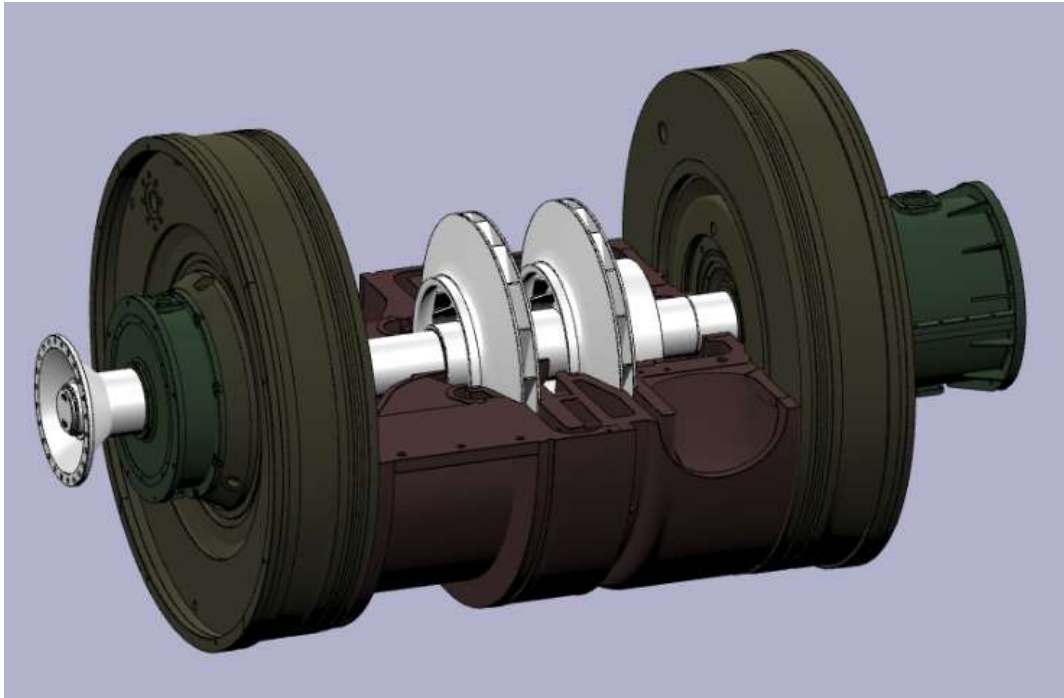


Рис. 3.5. Робота алгоритму контекстного фокусування на активному вузлі (роторі) шляхом затінення неактивних елементів (корпусу)

5) **Обробка подій (Event Handling):** Система прослуховує вхідні сигнали:

- *Input Events:* Дії користувача з інтерактивними об'єктами (виклик дозволених афордансів з множини *Act*, наприклад, просторове переміщення Drag-and-Drop або активація).
- *Timer Events:* Спрацювання таймерів (наприклад, час на виконання операції), що дозволяє керувати подіями з часовими обмеженнями (Time-Triggered events) [Zhong et al., 2024].

- *Simulation Events*: Події від фізичного рушія (наприклад, «тиск перевищив критичне значення»).
- 6) **Валідація переходу:** При настанні події перевіряється доступність відповідного переходу tr . Рушій валідує наявність необхідних токенів у поточному маркуванні ($S_{pre} \subseteq M_{current}$), а також виконання просторових умов Val (точність позиціювання).
 - 7) **Виконання наслідків:** Якщо перехід дозволено, рушій оновлює глобальне маркування $M_{current}$ (генеруючи нові локальні стани S_{post}) та ініціює виклик функцій візуального відгуку (δ) через звернення до Базис універсальних дій (Action Library). Запускаються відповідні тригери: процедурна анімація кінематики K , відтворення звуку та інше.

Вищезазначена послідовність етапів формує замкнений цикл інтерпретації простору станів. Особливістю цього циклу є наявність двох паралельних контурів обробки: контуру спрацьовування системних τ -переходів та/або авто-переходів (для динамічного зниження когнітивного навантаження) та контуру обробки подій користувача із просторовою валідацією й блокуванням ресурсів. Повну блок-схему алгоритму життєвого циклу обробки багатокористувацького сценарію в середовищі виконання наведено на рис. 3.6.

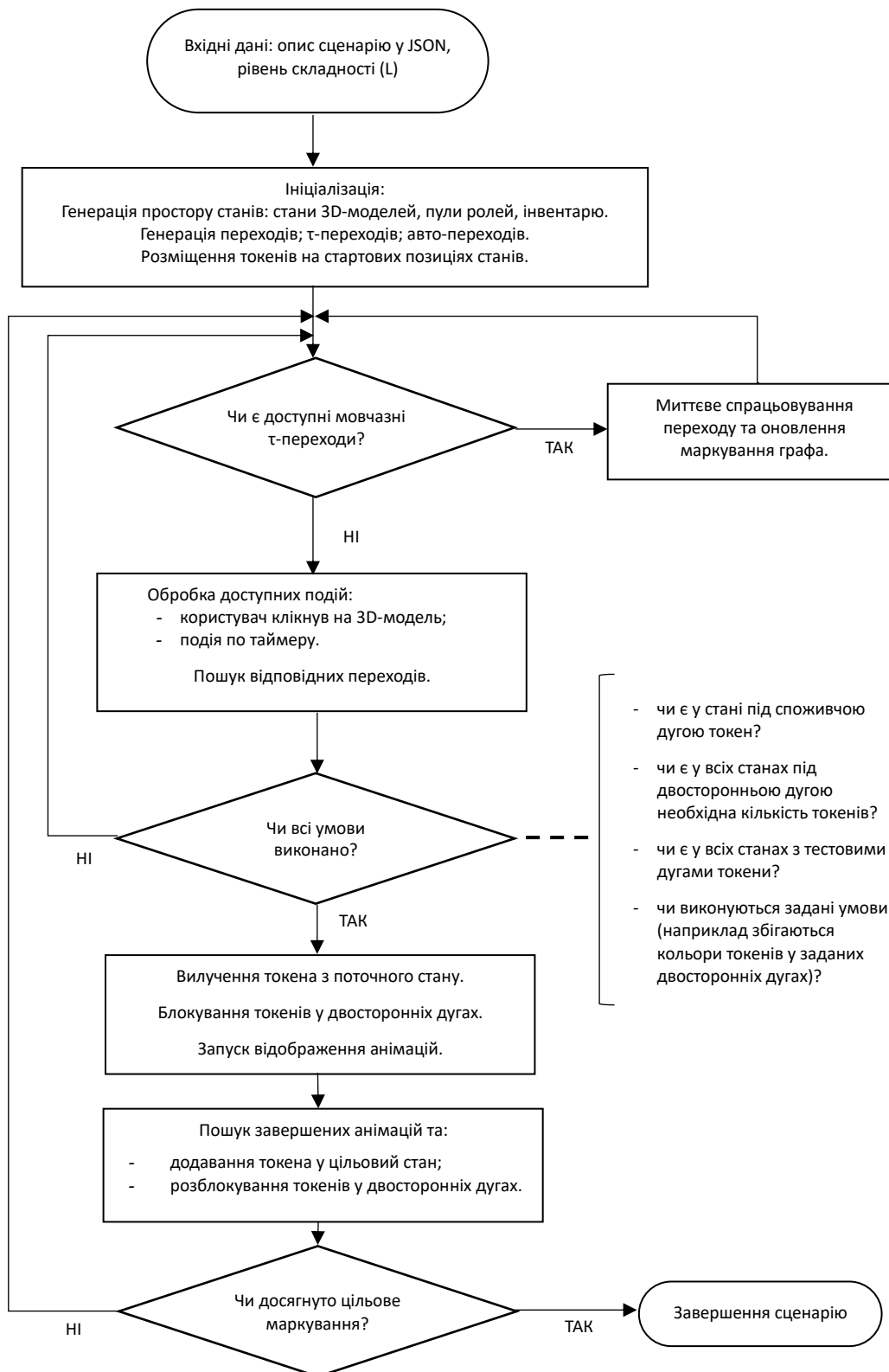


Рис. 3.6. Блок-схема алгоритму динамічної інтерпретації та виконання багатокористувацького сценарію (Runtime Engine)

3.4.2. Алгоритмічне забезпечення процедурного рознесення деталей

Для забезпечення можливості детального вивчення будови складних агрегатів реалізовано режим процедурного рознесення деталей («Explode View»).

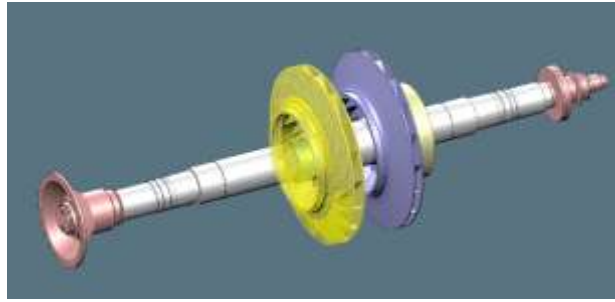
Актуальність цього підходу підтверджується найновішими дослідженнями [Mariscal-Melgar, 2025], де наголошується на необхідності відокремлення логіки трансформацій від 3D-геометрії. Замість створення окремих анімацій для кожного вузла, розроблено алгоритм, що обчислює вектори зміщення в реальному часі:

- 1) **Розрахунок центроїда:** Визначається геометричний центр агрегату C_{global} .
- 2) **Визначення вектора зміщення:** Для кожної деталі i обчислюється вектор $\vec{V}_i = P_i - C_{global}$.
- 3) **Застосування коефіцієнта:** Позиція деталі в кожному кадрі залежить від керуючого параметра $\lambda \in [0,1]$ (ступінь рознесення, значення якого динамічно змінюється користувачем через інтерфейс:

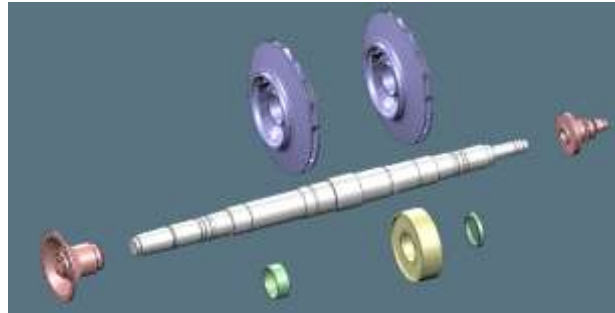
$$P_{new}(i) = P_{base}(i) + \vec{V}_i \cdot \lambda \cdot K_{depth}$$

де K_{depth} – коефіцієнт глибини вкладеності (внутрішні деталі зміщуються менше, зовнішні – більше).

Результат застосування алгоритму процедурного рознесення деталей для ротора компресора в режимі реального часу наведено на рис. 3.7.



(а)



(б)

Рис. 3.7. Процедурне рознесення деталей (Explode Mode) для вивчення внутрішньої будови: а – вихідний стан вузла; б – застосування вектора зміщення до ієрархії об'єктів

3.4.3. Система контролю та валідації точності дій

Реалізовано механізм перевірки правильності виконання монтажних операцій, що базується на контекстних параметрах валідації Val , інкапсульованих у графових переходах tr моделі МРВ (описаній у п. 2.2.1).

Перевірка позиціювання: При переміщенні деталі (Drag-and-Drop) рушій у кожному кадрі розраховує евклідову відстань між поточною позицією екземпляра об'єкта та цільовим вектором монтажу P_{target} , визначеним для даної дії.

Логіка «примагнічування» (Snapping):

- При рівні складності $L = \text{Basic}$ поріг толерантності $Tol(L)$ є високим ($\Delta d = 0.5$ м). Якщо деталь потрапляє в цю зону, ядро виконання застосовує алгоритм просторового автодоведення

(snapping): координати та поворот об'єкта алгоритмічно інтерполюються до значень P_{target} та q_{target} .

- При рівні складності $L = \text{Expert}$ поріг є мінімальним ($\Delta d = 0.01$ м, $\Delta \alpha = 5^\circ$), а просторове автодоведення вимикається. Для досягнення умови Success користувач повинен самостійно прецизійно позиціонувати та зорієнтувати деталь у тривимірному просторі.

3.4.4. Алгоритмічне забезпечення системи підказок та контролю

Для реалізації навчальної методики розроблено адаптивний алгоритм супроводу користувача, який працює у двох режимах:

Режим «Навчання» (Training Mode): Алгоритм аналізує поточне маркування системи $M_{current}$ і визначає множину дозволених переходів $TR_{enabled}$. На основі цих даних формується система підказок, яка також враховує рівень когнітивного навантаження [Isingizwe et al., 2024] та фактор стресу від раптових подій [Haus et al., 2012]:

- *Візуалізація підказки:* Якщо користувач не діє протягом часу t_{idle} , система активує візуальний маркер (наприклад, ефект «світіння» шейдера) на об'єктах, що входять до множини передумов S_{pre} доступних дій.
- *Метод «Привид» (Ghost Object):* Для просторових операцій відображається напівпрозора копія деталі, просторова прив'язка якої задається векторами P_{target} та q_{target} з атрибута Val відповідного переходу tr .

Режим «Іспит» (Exam Mode): Підказки повністю деактивовано. Якщо передбачено налаштуваннями сценарію – активовано зворотній відлік часу, який надано на проходження сценарію. Завдяки підтримці справжньої паралельності дій, алгоритм не вимагає дотримання жорсткої

лінійної «еталонної послідовності», а динамічно валідує дії користувача, звіряючи їх із простором досяжних маркувань графа МРВ.

Обробка помилок та динамічне оцінювання: Завдяки математичній строгості графа, архітектура рушія підтримує автоматичну оцінку дій учня у двох парадигмах:

1. *Неявні помилки (Implicit Errors):* Якщо ініційований користувачем перехід tr не входить до множини поточних дозволених дій (не виконані передумови S_{pre} або охоронні умови інвентарю), він алгоритмічно блокується. Рушій автоматично перехоплює цей невалідний клік, виводить попередження та знімає штрафні бали (згідно з налаштуваннями сценарію), не вимагаючи від інструктора малювати ці помилки на графі.
2. *Явні помилки (Explicit Errors):* Явні порушення безпеки моделюються інструктором як окремі переходи із окремою гілкою сценарію. Це можуть критичні помилки, які призводять до аварій, що миттєво завершують симуляцію з нульовою оцінкою. А можуть бути і некритичні помилки, що змінюють стан елементів сценарію із нарахуванням окремо вказаних штрафних балів.

Кожна така подія (як успішна, так і помилкова) автоматично фіксується клієнтським рушієм у структурований лог формату xAPI (Experience API). Зібраний масив даних формує репрезентативну базу для аналітики (наприклад, побудови теплових карт типових помилок), у тому числі для інтеграції з високорівневими системами ранжирування компетентності фахівців. Зокрема, ці дані можуть бути використані як вхідні параметри для математичних моделей розрахунку рейтингу на

основі системи Ело, адаптація якої для потреб енергетики була успішно обґрунтована у працях [Абрамович, Самойлов, 2021].

Додатково, для комплексного контролю кваліфікації (поєднання практичних навичок у 3D та теоретичної бази), перспективною є інтеграція навчальної системи з підсистемами автоматизованої генерації тестових завдань на базі великих мовних моделей (LLM). Як доведено у дослідженнях [Самойлов et al., 2023], використання технологій штучного інтелекту в системах типу «АСКО» дозволяє автоматизувати створення релевантних теоретичних тестів на основі технічної документації АЕС, що органічно доповнює практичний модуль екзаменаційного режиму.

3.4.5. Програмна реалізація процедурної анімації

Для відтворення динаміки роботи енергетичного обладнання (на основі отриманих мережевих параметрів, згідно з п. 2.4) реалізовано методи процедурної анімації. На відміну від попередньо записаних анімацій (baked animation), цей підхід дозволяє керувати візуалізацією в реальному часі через зміну числових параметрів.

Ротаційна динаміка: Обертання роторів, валів та коліс реалізовано через пряму алгоритмічну маніпуляцію локальною матрицею трансформації екземпляра об'єкта (T_{local}) у кожному кадрі рендерингу на базі центрального процесора (CPU). Кутова швидкість ω отримується від модуля синхронізації або розраховується локально за аналітичною кривою розгону. Інтерпретатор зчитує кінематичні обмеження K (дозволену вісь обертання) з базового шаблону об'єкта та динамічно оновлює кут повороту θ на основі формул клієнтської реконструкції (п. 2.4.2) без використання жорстко закодованих анімаційних кривих.

3.5. Алгоритмічне забезпечення мережевої синхронізації на основі методу реплікації гармонічних станів

Для забезпечення стабільної роботи багатокористувацьких сценаріїв в умовах обмеженої пропускної здатності каналів зв'язку (наприклад, мобільний інтернет 3G/Edge на віддалених об'єктах), розроблено та програмно реалізовано спеціалізований метод. Це особливо актуально для таких ресурсоємних завдань, як багатокористувацьке інспектування об'єктів енергетики за допомогою дронів [Chae, Ko, 2024]. На відміну від традиційних підходів (State Synchronization), що безупинно транслюють координати об'єктів із заданою частотою (Tick Rate), реалізований метод має гібридну архітектуру. Для детермінованих процесів він оперує виключно спектральними параметрами фізичних законів, радикально знижуючи трафік. Водночас для непередбачуваних користувацьких дій метод використовує механізми динамічного саморегулювання та серверного арбітражу, гарантуючи абсолютну консистентність багатокористувацької симуляції.

Загальну архітектуру розробленого гібридного методу мережевої синхронізації відображено на рис. 3.8.

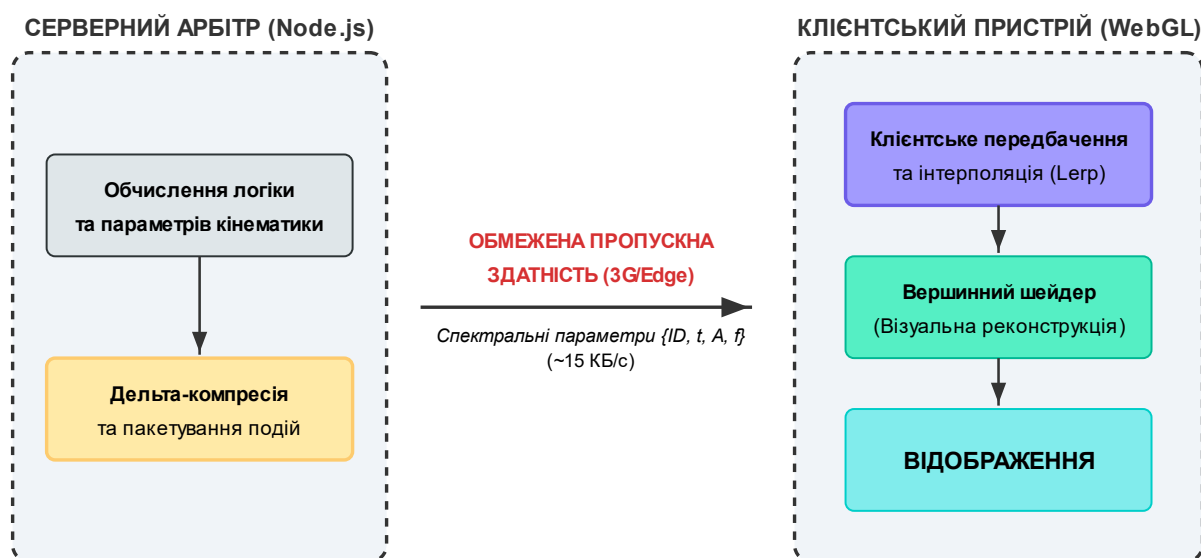


Рис. 3.8. Архітектура гібридного методу мережевої синхронізації

3.5.1. Структура пакетів обміну даними

Обмін даними між клієнтом і сервером реалізовано на базі технології WebSocket, що забезпечує повнодуплексний зв'язок поверх протоколу TCP. Вибір TCP (замість UDP) зумовлений не лише вимогою гарантованої доставки повідомлень, але й вимогами кібербезпеки. Як показано в дослідженні [Benhabbour et al., 2023], розподілені віртуальні середовища є вразливими до специфічних атак (наприклад, Lag Switch або DDoS), спрямованих на порушення синхронізації станів. Використання гарантованої доставки пакетів мінімізує ці ризики.

Розроблено оптимізований формат пакетів даних (Physics Payload), який мінімізує обсяг мережевого трафіку. Структура корисного навантаження інкапсулює системний ідентифікатор події, глобальну мітку часу (Timestamp) та вектор фізичних параметрів моделі (наприклад, амплітуду, частоту та вектор осі коливань для вібрації). Формалізована специфікація структури пакету наведена у Додатку В (п. В.3).

Завдяки такій архітектурі розмір одного пакету синхронізації складає менше 100 байт. Для порівняння: класична передача «сирих» координат об'єкта з частотою 60 Гц генерувала б безперервний потік даних обсягом понад 20 КБ/с для кожної динамічної деталі, що швидко вичерпує пропускну здатність мобільних мереж.

3.5.2. Реалізація алгоритму клієнтського передбачення (Client-Side Prediction)

Клієнтський модуль містить алгоритм клієнтського передбачення (Client-Side Prediction) [Soorya et al., 2024], який реконструює рух об'єкта на основі отриманих параметрів. Цей підхід успішно застосовується у критичних кіберфізичних системах (наприклад, для телекерування БПЛА [Cox, Wong, 2019]), а концепція передачі фізичних параметрів замість

координат визнається одним із найперспективніших методів радикального стиснення даних [Hu et al., 2025].

Алгоритм працює наступним чином:

- 1) **Отримання пакету:** Клієнт отримує подію з міткою часу сервера t_{server} .
- 2) **Синхронізація часу:** Виконується корекція локального часу з урахуванням мережевої затримки ($RTT / 2$).
- 3) **Локальна симуляція:** Запускається процедурна анімація. Для оптимізації обчислювального навантаження на клієнтському пристрої, локальна реконструкція рухів розділяється на два контури залежно від частоти процесу:
 - Низькочастотні макропереміщення (наприклад, обертання ротора) обчислюються на центральному процесорі (CPU) з подальшою зміною матриці трансформації об'єкта.
 - Високочастотні осциляції (наприклад, аварійна вібрація корпусу з частотою 50 Гц і вище) обробляються за допомогою вершинних шейдерів (Vertex Shaders). Клієнтський рушій не змінює фізичні координати об'єкта в сцені, а передає отримані з мережі спектральні параметри (амплітуду A та частоту f) безпосередньо у пам'ять графічного процесора (GPU) як uniform-змінні. Псевдокод алгоритму клієнтської візуалізації мережевих параметрів за допомогою вершинного шейдера наведено у Додатку В, п. В.2.

Просторовий кінематичний стан екземпляра об'єкта X_{client} у кожному розрахунковому кадрі (t_{now}) обчислюється локально за відповідним аналітичним законом (наприклад, для гармонічного коливання, як обґрунтовано у п. 2.4.2):

$$\vec{X}_{client}(t_{now}) = \vec{X}_{base} + \vec{A} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot (t_{now} - t_{start}))$$

Такий підхід забезпечує абсолютну плавність кінематики навіть при втраті пакетів або нестабільній мережевій затримці (Latency jitter), оскільки клієнт продовжує виконувати детермінований математичний закон руху автономно до отримання нової керівної події від сервера. Водночас делегування обчислень на рівень вершинних шейдерів графічного процесора забезпечує візуально-діагностичну еквівалентність відображення без залучення важких систем інженерного моделювання (CAE).

3.5.3. Механізм корекції розбіжностей (State Reconciliation)

Для запобігання накопиченню помилок (десинхронізації) реалізовано механізм періодичної звірки станів на основі концепції «Server Authority» та рольової схеми контролю паралельного доступу (Role-based concurrency control) [Yu et al., 2004]. Відповідно до гібридної моделі (п. 2.4.3), сервер динамічно адаптує частоту розсилки еталонних даних залежно від навантаження та стану мережі, періодично надсилаючи всім клієнтам глобальний «ключовий кадр» (Snapshot) або дельту змін.

Клієнтський алгоритм самостійно порівнює свій поточний локальний стан з отриманим еталонним. Якщо просторова розбіжність перевищує поріг толерантності Δ , застосовується **лінійна інтерполяція (Lerp)** для плавного, непомітного для ока користувача, приведення об'єкта до еталонного вектора протягом адаптивного вікна інтерполяції Δt_{lerp} (значення якого емпірично встановлюється, наприклад, на рівні 300–500 мс залежно від поточної мережевої затримки RTT). Це запобігає виникненню різких візуальних розривів та ефекту «телепортації» об'єктів («rubber-banding»), зберігаючи комфортне для вестибулярного апарату користувача плавне відтворення кінематики.

3.5.4. Обробка стохастичних процесів

Для синхронізації випадкових процесів (наприклад, турбулентність рідини або шум) реалізовано передачу зерна генерації (**Random Seed**). Сервер генерує *Seed* один раз і передає його всім клієнтам. Клієнтські генератори псевдовипадкових чисел (PRNG), ініціалізовані однаковим зерном, продукують ідентичні послідовності візуальних. Однак, для запобігання накопиченню помилок обчислень з плаваючою комою (floating-point non-determinism) у гетерогенних апаратних середовищах, механізм використання спільного Random Seed в обов'язковому порядку доповнюється динамічною примусовою розсилкою сервером повних знімків стану (Snapshots) для жорсткої корекції (State Reconciliation) параметрів на клієнтах.

3.6. Висновки до розділу 3

1. Реалізована загальна структура архітектури програмного комплексу інтерактивного навчання, яка не передбачає додаткові інсталяцій плагінів чи ПЗ, забезпечує кросплатформенність та зберігання навчального контенту та статистики на захищеному сервері.

Архітектура комплексу базується на базовій топології, на основі якої розроблено розширену мікросервісну компонентну модель системи, яка:

- на рівні даних та серверної логіки забезпечує централізоване зберігання контенту, обробку мережевих подій та реалізує логіку доступу. Усі бази даних та репозиторії функціонують як складові єдиної інформаційної системи на засадах системи контролю версій, забезпечуючи збереження повної історії змін об'єктів для підтримки механізму фіксації залежностей;
- На рівні візуального проєктування забезпечує можливості розробки експертом навчального контенту (сценаріїв),

- включаючи: модуль для завантаження інженерних CAD-моделей та генерації безпечних оболонок згідно з методом автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, візуальний інтерфейс побудови сценаріїв, алгоритмічний блок з верифікації сценаріїв;
- На рівні представлення та виконання клієнтський модуль, що включає ядро виконання, модуль кінематики та анімації та модуль синхронізації.
2. Алгоритмічно реалізовано метод автоматичного видалення внутрішньої топології віртуальних 3D-моделей у вигляді конвеєра обробки даних (Data Pipeline), що автоматизує застосування функції трансформації геометрії.
 3. Розроблено алгоритмічне забезпечення візуального створення сценаріїв, їх верифікації та управління когнітивним навантаженням, яке включає візуальний редактор сценаріїв, який реалізує концепцію «No-Code», дозволяючи створювати граф навчального сценарію шляхом маніпуляції візуальними блоками, які автоматично трансформуються системою у програмний код, що повністю відповідає актуальним потребам нетехнічних спеціалістів. На етапі створення сценаріїв використовується орієнтований дводольний граф, ізоморфний мережам Петрі, розроблено та впроваджено алгоритми процедурної генерації переходів графа, реалізовано механізм точок синхронізації. Етап верифікації сценаріїв включає кроки: перевірка зв'язності, виявлення тупикових ситуацій, перевірка цілісності ресурсів та простору досяжних маркувань щодо перевантаження етапів стосовно допустимого когнітивного навантаження. Результатом роботи модулів є отримання математично коректного JSON-маніфесту сценарію.
 4. Реалізовано клієнтський модуль виконання багатокористувацького сценарію та його повний життєвий цикл. Представлено структурно-

функціональну схему алгоритмічної взаємодії модулів проєктування та виконання, що включає завантаження сценарію, ідентифікацію контексту, динамічну фільтрацію переходів, контекстне візуальне фокусування, обробку подій, валідацію переходу та його реалізацію, що формують замкнений цикл інтерпретації простору станів. Замість створення окремих анімацій для кожного вузла, розроблено алгоритм, що обчислює вектори зміщення в реальному часі. Реалізовано механізм перевірки правильності виконання монтажних операцій. Для реалізації процесу навчання розроблено алгоритмічне забезпечення системи підказок та механізми динамічного оцінювання дій користувача (обробка неявних та явних помилок із генерацією структурованих логів у форматі xAPI).

5. Алгоритмічно забезпечено мережеву синхронізацію на основі методу реплікації гармонічних станів. Програмне забезпечення модуля включає:

- оптимізований формат пакетів даних, що інкапсулює системний ідентифікатор, глобальну мітку часу та спектральні параметри фізичної моделі (частоту, амплітуду);
- алгоритм клієнтського передбачення (Client-Side Prediction), який реконструює просторовий кінематичний стан об'єкта. Алгоритм оптимізує обчислювальне навантаження, виконуючи низькочастотні макропереміщення на CPU, а високочастотні осциляції делегує на рівень вершинних шейдерів графічного процесора (GPU);
- механізм корекції розбіжностей (State Reconciliation) із використанням алгоритму лінійної інтерполяції (Lerp) та динамічного саморегулювання частоти розсилки еталонних серверних станів для компенсації мережевих затримок;

- алгоритм обробки стохастичних процесів через передачу зерна генерації (Random Seed) у поєднанні з періодичною розсилкою повних знімків стану (Snapshots) для жорсткої корекції.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

4.1. Практична реалізація технології на прикладі навчального сценарію для насосного обладнання АЕС

Апробацію розроблених методів, моделей та програмних засобів виконано в ході створення інтерактивних навчальних сценаріїв для підготовки персоналу з обслуговування насосного обладнання атомних електростанцій (зокрема, 8-ступеневих агрегатів типу ЦНС – відцентрових насосів секційних).

Вибір об'єкта моделювання зумовлений його критичністю для безпеки енергоблоку та складністю процедур технічного обслуговування, які вимагають від персоналу чіткого знання внутрішньої будови та послідовності операцій [Shevchenko, Shevchenko, 2024].

4.1.1. Етап підготовки та оптимізації інженерних 3D-даних

Вхідними даними для створення слугувала інженерна 3D-модель 8-ступеневого насоса ЦНС (CAD) від заводу-виробника (показаної на рис. 4.1).

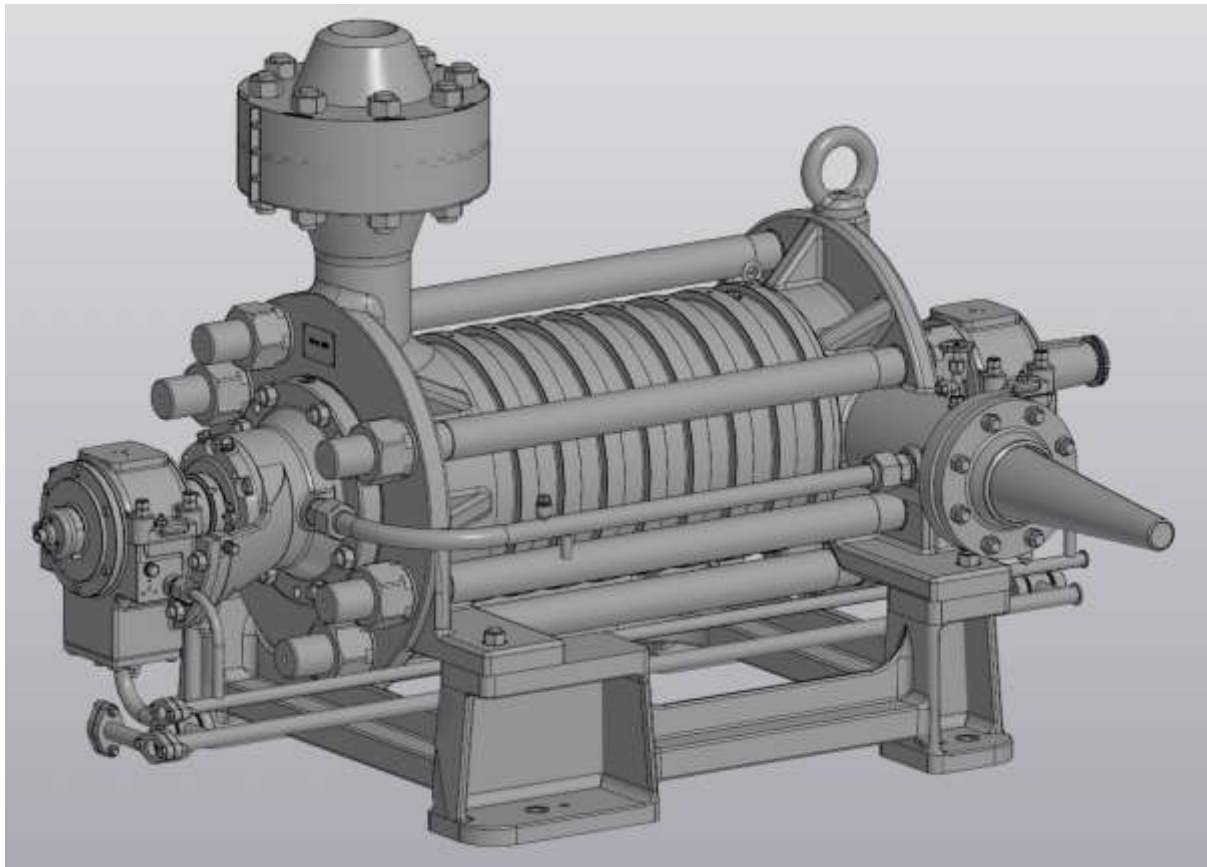


Рис. 4.1. Вихідна інженерна CAD-модель насоса ЦНС

Процес трансформації включав наступні кроки:

- 1) **Сегментація:** Модуль імпорту перетворив геометрію з інженерного файлу (CAD) у логічні функціональні вузли (8 однакових секцій, загальний корпус, ротор, масиви кріплень), ініціалізувавши їх як базові 3D-шаблони (Templates).
- 2) **Фільтрація («Black Box»):** Після прив'язки 3D-моделі до логіки сценарію на етапі компіляції для вузлів, що не підлягають розбиранню згідно з предикатом участі $Used(O_i, TR) = 0$ (наприклад, статор електродвигуна), було автоматично застосовано алгоритм генерації безпечної оболонки (Shrinkwrap) із видаленням внутрішньої геометрії. Це дозволило зменшити кількість полігонів з 2.5 млн (результат базової теселяції оригіналу) до 260 тис., що забезпечило стабільну частоту рендерингу (Rendering Rate) у веб-браузері. У

результаті згенерований для веб-плеєра GLB-файл містить на 90% менше полігонів порівняно зі стандартною прямою теселяцією вихідної інженерної моделі. Завдяки імплементації принципу «необхідного знання» (Need-to-Know) на геометричному рівні, отриманий цифровий об'єкт ускладнює реверс-інжиніринг пропрієтарних креслень, оскільки внутрішня топологія агрегату фізично знищується під час конвеєрної обробки.

- 3) **Атрибуція:** До кожного вузла прив'язано метадані (маса, кінематичні обмеження ступенів вільності DoF, посилання на бази Material Library та Tech Library), необхідні для ініціалізації екземплярів об'єктів та подальшої фізичної симуляції.

4.1.2. Створення сценаріїв у візуальному редакторі

За допомогою розробленого модуля «Редактор» (п. 3.3) інженерами було створено граф сценарію «Регламентне розбирання проточної частини». Налаштування системи дозволяє гнучко адаптувати рівень інтерактивності під кожну роль, що повністю відповідає спостереженням щодо виражених поведінкових відмінностей (role-based differences) між учасниками кооперативних сесій [Mulero-Perez et al., 2025].

Сценарій реалізовано як послідовність станів (граф МРВ), що включає:

- *Підготовчі операції:* Перевірка відсутності тиску (візуалізація манометрів), знеструмлення (етап містить емерджентну точку синхронізації: перехід доступний слюсарю лише після генерації токена «знеструмлено» роллю «Електрик»).
- *Демонтаж:* Послідовне зняття кріпильних елементів. Система автоматично згенерувала анімацію вигвинчування болтів на основі кінематичних обмежень ступенів вільності (DoF) їхніх базових

шаблонів, використовуючи механізм «Пулів дій» (Action Pools) для масиву болтів.

- *Дефектація*: Виконання цільової дії (афордансу Inspect), що ініціює контекстне звернення до бази знань (Tech Library) для динамічного підвантаження дефектувальної карти робочого колеса безпосередньо у віртуальне середовище.

4.1.3. Візуалізація високочастотних діагностичних ознак

Для відпрацювання навичок візуальної діагностики було імплементовано механізм відображення високочастотних процесів на базі отриманих мережевих параметрів (відповідно до алгоритму з п. 3.5.2)

Сценарій «Аварійна вібрація»: Реалізовано імітацію підвищеної вібрації підшипникових опор. Амплітуда та частота коливань, що надходять від серверного арбітра у вигляді компактного пакета даних, передаються безпосередньо у вершинний шейдер (Vertex Shader) графічного конвеєра. Це дозволило користувачеві візуально ідентифікувати аномалію роботи агрегату без використання числових індикаторів та без критичного падіння частоти кадрів (FPS).

4.1.4. Оцінка ефективності застосованих рішень

Створений багатокористувацький прототип функціональних модулів (що концептуально відповідає парадигмі спільних віртуальних середовищ для Індустрії 4.0 [Dewberry et al., 2025]) було розгорнуто на стандартному веб-сервері. На відміну від систем, що вимагають розгортання дороговартісної інфраструктури граничних обчислень (Mobile Edge Computing) для подолання затримок відеострімінгу [Du et al., 2020], запропонована архітектура з клієнтським розрахунком фізики дозволила забезпечити доступ до навчання з будь-якого комп'ютера в корпоративній

мережі через стандартний браузер (Chrome/Edge) без встановлення додаткового ПЗ.

Порівняння з традиційними методами показало:

- 1) **Доступність:** Час розгортання навчального місця скоротився з годин (інсталяція "важкого" клієнта) до секунд (завантаження сторінки).
- 2) **Безпека даних:** Завдяки алгоритму фільтрації, на клієнтські пристрої передається лише зовнішня оболонка обладнання, що унеможливорює витік конструкторських секретів виробника та реалізує політику Data Leakage Prevention (DLP).

4.2. Експериментальне дослідження ефективності алгоритмів синхронізації

Для підтвердження гіпотези про переваги запропонованого методу реплікації гармонічних станів над традиційними підходами до синхронізації станів у розподілених системах, було проведено серію порівняльних експериментів.

4.2.1. Методика проведення експерименту

Як тестовий сценарій обрано імітацію швидкоплинних макрореміщень та обертальних процесів агрегату. Сценарій передбачає візуалізацію динамічної процедурної кінематики ротора на пристроях трьох користувачів одночасно.

Порівнювалися два методи синхронізації:

- 1) **Метод А (Raw State Synchronization):** Класичний підхід, при якому сервер розраховує положення об'єкта і безперервно транслює просторовий стан об'єкта $\vec{X}(t)$ клієнтам із частотою оновлення (Tick Rate) 20 Гц. Як базова лінія (baseline) використовувався стандартний компонент синхронізації трансформацій (Transform Network Sync) ігрових рушіїв.

2) Метод Б (Реплікація гармонічних станів): Запропонований автором підхід (п. 2.4, п. 3.5), при якому сервер передає лише параметри події (частота, амплітуда), а клієнт виконує локальну реконструкцію руху.

Тестування проводилося в умовах емуляції мобільної мережі (профіль 3G/Edge) з наступними параметрами (згенерованими за допомогою програмних засобів емуляції мережевих затримок):

- Пропускна здатність (Bandwidth): 1 Мбіт/с.
- Затримка (RTT): 150–300 мс.
- Втрата пакетів (Packet Loss): 2%.

4.2.2. Аналіз мережевого навантаження та оптимізації трафіку

Результати вимірювань мережевого трафіку для однієї сесії тривалістю 60 секунд показали кардинальну різницю в обсягах переданих даних.

Для Методу А: Обсяг трафіку лінійно залежить від тривалості події. Для передачі плавного руху необхідно надсилати мінімум 20 пакетів на секунду. Середнє навантаження склало **~12 КБ/с** на один динамічний об'єкт.

Для Методу Б: Обсяг трафіку залежить лише від кількості змін станів (ентропії системи). У тестовому сценарії було передано лише один пакет ініціалізації події розміром **~0.1 КБ**. Це підтверджує ефективність використання предиктивних (прогнозних) моделей для радикального зменшення трафіку у мережевих системах [Duarte Jr. et al., 2020].

Результати порівняльного аналізу мережевого навантаження представлено на рис. 4.2.

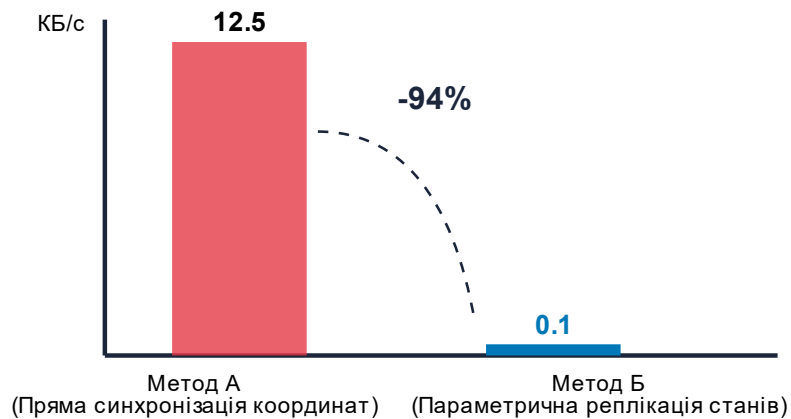


Рис. 4.2. Порівняння обсягів мережевого трафіку базових та запропонованих алгоритмів

Результат: Застосування методу реплікації гармонічних станів дозволило зменшити обсяг мережевого трафіку на **94%** порівняно з традиційним методом. Це підтверджує можливість використання системи на віддалених об'єктах з лімітованим або низькошвидкісним інтернет-з'єднанням. Детальний порівняльний аналіз архітектур синхронізації зведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Порівняльний аналіз методів синхронізації в інтерактивних дистанційних навчальних системах

Характеристика	State Synchronization (Класичний підхід)	Dead Reckoning (Традиційний метод)	Запропонований метод реплікації гармонічних станів
Передавані дані	Просторовий кінематичний стан (координати	Вектор швидкості та початкова позиція	Вектор фізичних параметрів моделі (A, f, ϕ)

	та кватерніони) у кожному такті		
Частота оновлень	Висока (20–60 Гц)	Середня (1–5 Гц)	Подійна (Event-Based, при зміні режиму/стану)
Навантаження на мережу	Високе (~20 КБ/с на об'єкт)	Середнє	Мінімальне (<1 КБ/с, зменшення трафіку на 94%)
Стійкість до затримок	Низька (Jitter, Rubber-banding)	Середня (різкі стрибки при корекції розбіжностей)	Висока (плавна алгоритмічна інтерполяція кінематики)
Обчислювальне навантаження	Серверне	Змішане	Клієнтське (розрахунок за формулою)
Застосування у 3G/Edge	Критично ускладнено (через втрату пакетів)	Обмежено	Висока стабільність

4.2.3. Оцінка якості візуалізації та стійкості до затримок

Критичним параметром при навчанні є плавність анімації. Ривки або «телепортація» об'єктів (Jitter) руйнують ефект імерсивності (embodiment) у віртуальному просторі та можуть призвести до помилкової діагностики несправності.

При використанні Методу А: В умовах нестабільної мережевої затримки (Latency jitter > 50 мс) спостерігалася нерівномірність руху. Пакет із координатами приходив із запізненням, що змушувало клієнтську

програму екстраполювати рух, а потім різко коригувати позицію при отриманні нових даних («ефект гумової стрічки»).

При використанні Методу Б: Оскільки клієнтський рушій (Runtime Engine) використовує детерміновану математичну функцію для локального розрахунку кінематичного стану (наприклад, $\vec{X}_{client}(t) = \vec{X}_{base} + \vec{A} \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$), кінематика залишалася абсолютно плавною зі стабільною частотою рендерингу незалежно від коливань мережевої затримки.

Графічне відображення усунення візуальних артефактів затримок (jitter) завдяки процедурній реконструкції наведено на рис. 4.3.

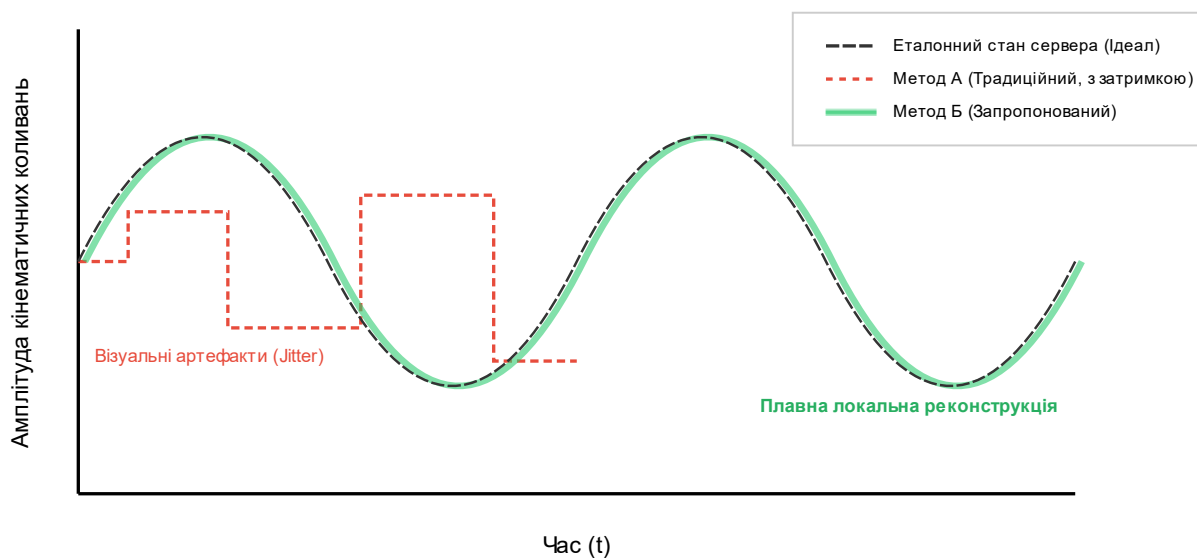


Рис. 4.3. Оцінка стійкості відтворення високочастотної кінематики до мережевих затримок

Середньоквадратичне відхилення (RMSE) візуальної позиції від еталонної для запропонованого методу виявилось в 4 рази меншим, ніж для класичного підходу в умовах деградованої мережі. Збереження високого рівня візуальної достовірності при використанні аналітико-параметричних моделей для компенсації затримок узгоджується з новітніми емпіричними дослідженнями у сфері VR [Tao et al., 2023].

4.2.4. Аналіз обчислювального навантаження на клієнті

Було перевірено гіпотезу про те, що перенесення розрахунків на клієнт може спричинити надмірне обчислювальне навантаження на клієнтське робоче місце (ноутбук, планшет, або мобільний пристрій). Вимірювання на тестовому пристрої (планшеті з архітектурою ARM середнього цінового діапазону) показало незначний приріст утилізації ресурсів CPU/GPU лише на 5–8% при використанні запропонованого методу. Це є допустимим компромісом за значне покращення якості візуалізації та зниження вимог до мережі.

4.3. Оцінка екологічної та інфраструктурної ефективності рішень («Green Computing»)

Впровадження розробленої інформаційної технології було оцінено не лише з технічної, але й з екологічної точки зору. У сучасному світі цифровізація розглядається як ключовий інструмент декарбонізації промисловості. На основі методології, викладеної у праці [Shevchenko T. et al., 2024], проведено аналіз впливу використання дистанційних навчальних систем на вуглецевий слід (Carbon Footprint) процесу підготовки персоналу, що узгоджується з сучасними світовими ініціативами щодо «озеленення» технологій цифрових двійників [Verma et al., 2025].

4.3.1. Екологічний ефект дематеріалізації навчальної бази

Традиційний підхід до навчання ремонтного персоналу передбачає використання фізичних макетів (розрізних моделей насосів, запірної арматури).

Матеріаломісткість: Середній навчальний стенд (наприклад, модель насоса ЦНС в масштабі 1:1) потребує використання від 500 до 2000 кг металу. Виробництво 1 тонни сталі супроводжується викидами приблизно 1.85 тонни CO₂.

Життєвий цикл: Фізичні стенди мають обмежений ресурс, потребують витратних матеріалів (мастило, обтиральні матеріали) для обслуговування, а після морального застарівання перетворюються на відходи, що потребують утилізації.

Запропонована технологія дозволяє замінити фізичні об'єкти їхніми цифровими двійниками. Створення та тиражування програмного забезпечення потребує мінімальних витрат матеріальних ресурсів (Operational Carbon) порівняно з фізичним виробництвом. За розрахунками, перехід на віртуальні навчальні системи для однієї навчальної групи дозволяє запобігти викидам CO₂, еквівалентним виробництву та утилізації кількох тонн металоконструкцій. Це відповідає стратегії «Virtualize» у рамках парадигми ресурсощадних ІТ-технологій.

4.3.2. Зменшення вуглецевого сліду логістичних процесів

Специфіка енергетики полягає у географічній розподіленості об'єктів. Класична очна форма навчання вимагає відрядження персоналу до спеціалізованих навчально-тренувальних центрів (НТЦ).

Розрахунок: Для групи з 10 осіб, що подорожують на відстань 500 км (туди й назад) автотранспортом або залізницею, сумарний вуглецевий слід складає сотні кілограмів CO₂.

Ефект системи: Реалізована веб-архітектура дозволяє проводити навчання безпосередньо на робочих місцях або дистанційно. Це повністю усуває транспортні викиди, пов'язані з процесом навчання.

4.3.3. Порівняльний аналіз енергоефективності архітектурних рішень

Було проведено порівняння енергоспоживання двох підходів до реалізації 3D-навчання: хмарного рендерингу (Cloud Rendering / Pixel Streaming) та запропонованого клієнтського рендерингу (Client-side

WebGL). Енергетичні показники для аналізу базувалися на паспортних значеннях теплової потужності (Thermal Design Power – TDP) цільового обладнання.

Хмарний рендеринг:

- Вимагає роботи потужних графічних серверів (GPU) у дата-центрі. Середнє споживання одного серверного GPU під навантаженням – 250–300 Вт.
- Потребує постійної передачі відеопотоку високої чіткості, що навантажує мережеве обладнання (роутери, комутатори) на всьому шляху передачі даних [Viola et al., 2025]. Як доводять новітні дослідження [Su et al., 2025], традиційні хмарні підходи створюють надмірний тиск на інфраструктуру, тоді як перенесення рендерингу на кінцеві пристрої дозволяє знизити споживання ресурсів.

Клієнтський рендеринг (Запропонований підхід):

- Обчислення виконуються на кінцевих пристроях користувачів (планшети, офісні ноутбуки). Мобільні процесори (архітектура ARM) оптимізовані для енергоефективності і споживають 5–15 Вт [Romagnoli et al., 2023], що є критично важливим для мобільних клієнтів при розподілі навантаження [Rao, Babu, 2026].
- Мережевий трафік мінімальний (передаються лише JSON-пакети параметрів), що знижує енерговитрати на передачу даних.

Порівняння витрат трафіку архітектурних рішень проілюстровано на рис. 4.4.

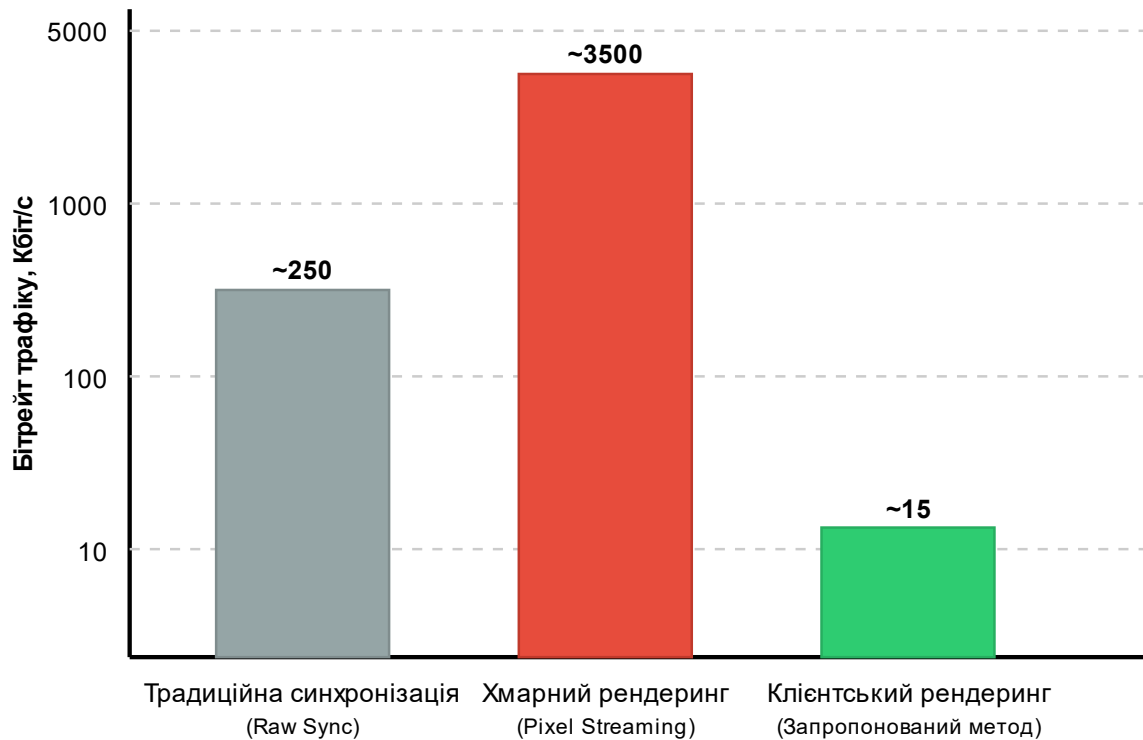


Рис. 4.4. Порівняльний аналіз витрат трафіку архітектур візуалізації

Результат: За умови одночасного навчання 100 користувачів, сумарне енергоспоживання системи на базі запропонованої архітектури є у **15–20 разів нижчим**, ніж при використанні хмарного рендерингу. Це робить розроблену систему не лише економічно вигідною (менші витрати на хостинг), але й екологічно стійкою.

Порівняння енергоспоживання архітектурних рішень проілюстровано на рис. 4.5, а узагальнену порівняльну характеристику екологічної та енергетичної ефективності досліджуваних систем зведено в табл. 4.2.



Рис. 4.5. Порівняльний аналіз енергоспоживання архітектур візуалізації

Таблиця 4.2. Екологічна та енергетична ефективність архітектур навчальних систем

Параметр	Фізичний стенд	Cloud Rendering (Pixel Streaming)	Client-Side WebGL (Запропонований)
Матеріаломісткість	Висока (метал, логістика)	Низька (обладнання ЦОД)	Мінімальна (виключно експлуатаційні витрати пристроїв)
Енергоспоживання (Вт/користувач)	N/A (виробництво + утилізація)	~300–500 Вт (GPU сервера + мережа)	~5–15 Вт (Мобільний процесор, зниження у 15–20 разів)

Вуглецевий слід (CO₂)	Тонни (виробництво)	Високий (Дата-центри)	Мінімальний
Масштабованість	Низька (1 група)	Середня (вартість GPU)	Необмежена

Отримані результати повністю узгоджуються з сучасними вимогами екологічних обчислень та глобальними ініціативами щодо досягнення нульового рівня викидів (Net-Zero Emission Frameworks) [Dalal et al., 2026].

4.4. Оцінка ефективності автоматизації процесу розробки навчального контенту

Одним із ключових завдань дослідження було зниження порогу входження у розробку 3D-навчальних матеріалів та скорочення часу створення нових сценаріїв. Для оцінки ефективності розробленого візуального редактора (описаного в п. 3.3) було проведено порівняльний аналіз трудомісткості розробки типового навчального модуля.

4.4.1. Методика порівняльного аналізу

Як тестове завдання було обрано створення сценарію «Повне технічне обслуговування запірної арматури», що включає 50 послідовних кроків (перевірка стану, розбирання, заміна ущільнень, збирання).

Порівнювалися два підходи до реалізації цього завдання:

Традиційний підхід (Programmatic Approach): Розробка сценарію у середовищі Unity (C#) професійним програмістом (з досвідом роботи понад 3 роки) шляхом написання коду логіки, налаштування аніматорів та компіляції проєкту.

Запропонований підхід (No-Code Approach): Створення сценарію фокус-групою з трьох інструкторів навчального центру (без навичок

програмування, після проходження базового 2-годинного інструктажу) у розробленому візуальному редакторі на основі підготовлених 3D-моделей.

4.4.2. Результати вимірювання часових витрат

Результати експерименту продемонстрували суттєве скорочення часу на всіх етапах життєвого циклу створення контенту:

- **Етап проєктування та реалізації логіки:**
 - *Традиційний підхід:* 24 людино-години (написання скриптів переходів, обробка подій UI, налагодження).
 - *Запропонований підхід:* 4 людино-години (візуальне маніпулювання блоками станів, застосування алгоритмів процедурної анімації пулів дій та авто-інверсії графа для етапу збирання).
 - *Ефект:* Прискорення у **6 разів**.

Графік порівняння часових витрат на проєктування логіки сценарію подано на рис. 4.6.

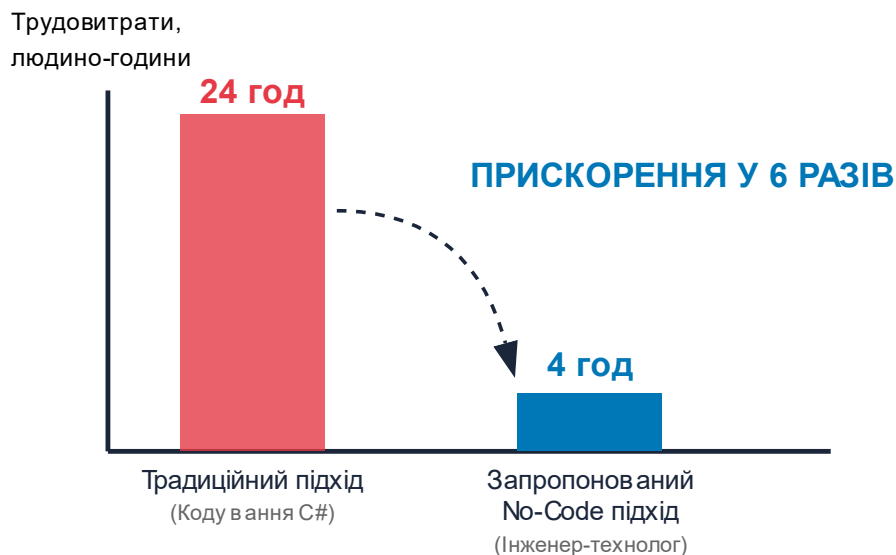


Рис. 4.6. Порівняння трудовитрат на етапі створення навчального контенту

- **Етап внесення змін (Iterative updates):**

У процесі апробації виникла потреба змінити порядок дій у середині сценарію (вставити додаткову перевірку).

- *Традиційний підхід:* Вимагав втручання в код, перекомпіляції проєкту та оновлення скомпільованого застосунку на клієнтських пристроях. Час: 2 години.
- *Запропонований підхід:* Інструктор модифікував топологію графа у візуальному редакторі. Завдяки клієнт-серверній архітектурі (динамічному завантаженню JSON-конфігурації), оновлення миттєво синхронізувалося з клієнтськими пристроями без перекомпіляції. Час: 10 хвилин.
- *Ефект:* Прискорення у **12 разів**.

4.4.3. Вплив автоматизованої верифікації на якість контенту

Важливим показником ефективності є кількість логічних помилок у готовому продукті.

При традиційному підході помилки типу «глухий кут» (користувач виконав дію, але нічого не сталося, і він не може продовжити) виявлялися лише на етапі ручного тестування (Runtime Testing).

У запропонованій системі вбудований модуль статичного аналізу (п. 3.3.4) автоматично попереджав перед збереженням сценарію про виявлення недосяжних цілей або термінальних нецільових маркувань (deadlocks) у згенерованому графі досяжності. Це дозволило **повністю виключити** логічні помилки ще на етапі проєктування, зекономивши час на тестуванні. Крім того, завдяки вбудованому аналізатору когнітивного навантаження інструктори змогли превентивно виявити та розбити на дрібніші етапи надмірно перевантажені кроки сценарію ремонту, що суттєво підвищило дидактичну якість кінцевого продукту.

4.4.4. Економічна доцільність застосування спеціалізованих візуальних редакторів

Перехід на технологію No-Code дозволяє докорінно змінити структуру витрат та життєвий цикл розробки інтерактивних навчальних матеріалів. У традиційній моделі створення контенту вимагає постійної взаємодії експерта предметної області та ІТ-спеціаліста, що неминуче призводить до багаторазових ітерацій правок через ефект «зіпсованого телефону» (хибне трактування програмістом фізики процесу). Запропонований підхід повністю виключає з цього ланцюжка дороговартісних розробників (наприклад, програмістів рівня Senior). Безпосереднє створення сценаріїв делегується самим інженерам та викладачам. Це не лише знижує первинну собівартість розробки навчального модуля на 60–70%, але й гарантує вищу дидактичну якість та достовірність симуляції.

Більше того, впровадження механізму незмінюваного контролю версій (Dependency Pinning) та архітектури «Шаблон-Екземпляр» суттєво зменшує сукупну вартість володіння системою (ТСО), оскільки цілеспрямовані зміни в базовому шаблоні автоматично та підконтрольно поширюються по всьому ланцюжку ієрархії успадкованих об'єктів. Це радикально прискорює масове оновлення контенту, а у випадку невдалої модифікації дозволяє швидко відновити пошкоджений сценарій, повністю запобігаючи каскадним збоям.

4.5. Апробація прототипу системи та перспективи впровадження

Практична цінність розроблених методів та програмних засобів підтверджена їх апробацією на базі тестових сценаріїв обслуговування обладнання підприємств енергетичної галузі України.

4.5.1. Апробація на базі навчально-тренувальних центрів

Розроблений програмний комплекс був розгорнутий у пілотному режимі для підготовки ремонтного персоналу.

Об'єкт апробації (моделювання): Навчальні сценарії з обслуговування 8-ступеневого насосного агрегату ЦНС (Відцентровий насос секційний).

Формат навчання: Дистанційний імерсивний курс на базі WebGL-клієнта («Zero-footprint») із використанням стандартного веб-браузера.

Результати апробації: Для оцінки ефективності було проведено контрольований експеримент. Експериментальна група ($N = 35$), що проходила підготовку з використанням навчального сценарію у 3D, продемонструвала середній час виконання операції $M_1 = 45.2$ хв ($\sigma = 4.1$), тоді як контрольна група ($N = 32$), що навчалася за традиційними методиками (відео + текст), показала $M_2 = 64.5$ хв ($\sigma = 5.8$). Розбіжність є статистично значущою згідно з t -критерієм Стьюдента для незалежних вибірок ($t = 15.6$, $p < 0.01$). Це математично доводить ефективність запропонованої системи у формуванні сенсомоторних навичок та дозволяє обґрунтовано стверджувати про покращення показників ефективності в середньому на 30%.

4.5.2. Відповідність галузевим стандартам

В ході апробації прототипу було підтверджено повну відповідність розробленої системи технічним вимогам ДП «НАЕК «Енергоатом» до програмного забезпечення навчального призначення, а саме:

- Забезпечено роботу в закритому контурі корпоративної мережі без доступу до зовнішнього Інтернету (завдяки автономності клієнтського рушія).
- Закладено архітектурні передумови для подальшої сумісності зі сторонніми системами дистанційного навчання (LMS), наприклад,

через стандарти SCORM або xAPI. Це забезпечується завдяки подійно-орієнтованій моделі клієнтського рушія (Runtime Engine), яка автоматично реєструє всі дії користувача, допущені помилки та час виконання етапів. Зібрані дані формують структурований лог сесії, що дозволяє в майбутньому інтегрувати модулі експорту цієї статистики до зовнішніх освітніх платформ через відповідні API.

- Підтверджено відсутність необхідності встановлення додаткових плагінів на робочі станції користувачів («Zero-footprint deployment»).

4.5.3. Перспективи практичного використання

Розроблений прототип програмного комплексу підготовлено до дослідно-промислової експлуатації та подальшого масштабування. Завдяки застосуванню парадигми «Шаблон-Екземпляр» та системи контролю версій (Dependency Pinning), запропоноване рішення має значний комерційний потенціал для зниження сукупної вартості володіння (TCO) навчальними комплексами на підприємствах. Крім того, результати можуть бути використані в освітнє середовище (educational environment) закладів вищої освіти технічного профілю в рамках освітніх проєктів (educational projects) для професійної підготовки (professional training) фахівців при вивченні дисциплін, пов'язаних із комп'ютерним моделюванням та інформаційними технологіями в енергетиці.

4.6. Висновки до розділу 4

1. Працездатність розроблених алгоритмів та системи в цілому перевірено на реальному прикладі створення навчальних сценаріїв для насосного обладнання АЕС.
2. Експериментально доведено ефективність розробленого аналітико-параметричного методу реплікації гармонічних станів. Результати порівняльних тестів показали зменшення обсягу мережевого трафіку

на 94% порівняно з традиційними методами передачі координат, що забезпечує стабільну роботу та фазову узгодженість розподілених сценаріїв у мобільних мережах (3G/Edge) в умовах затримок.

3. Проведено оцінку екологічної та інфраструктурної ефективності використання розробленої технології. Розрахунки підтвердили, що перехід на системи навчання у 3D з клієнтською візуалізацією (WebGL/WebXR) дозволяє реалізувати концепцію екологічних обчислень («Green Computing»), зменшуючи вуглецевий слід за рахунок дематеріалізації навчальної бази та зниження енергоспоживання серверної інфраструктури у 15–20 разів порівняно з технологіями хмарного стрімінгу (Pixel Streaming).
4. Встановлено, що використання розробленого візуального редактора («No-Code») дозволяє скоротити час проєктування логіки сценаріїв у 5–6 разів, а час внесення ітераційних змін – у 12 разів, суттєво знижуючи первинну собівартість розробки (на 60–70%) за рахунок залучення експертів предметної області замість програмістів. Додатково доведено, що впровадження механізму фіксації залежностей (Dependency Pinning) суттєво зменшує сукупну вартість володіння системою, усуваючи ризики каскадного руйнування логіки при масових оновленнях базових 3D-моделей.
5. Результати роботи успішно апробовано у навчальному процесі. Статистично достовірно (із рівнем значущості $p < 0.01$ за t-критерієм Стьюдента) підтверджено покращення показників ефективності формування сенсомоторних навичок у слухачів в середньому на 30% порівняно з традиційними методами навчання (вивчення технічної документації та 2D-мнемосхем), що засвідчується відповідними актами та довідками про використання/апробацію.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання з розробки інформаційної технології створення сценаріїв, їх верифікації та візуалізації при навчанні спеціалістів з ремонту насосного обладнання АЕС на основі представлення сценарію як мережі, заснованої на ідеї мереж Петрі із врахуванням ролей учасників сценарію, що дозволяє вирішувати завдання верифікації сценаріїв, а для уникнення візуального перевантаження при візуалізації дозволяє обмежувати обсяг інформації на сцені.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. **Проведено аналіз** сучасних методів створення інтерактивних навчальних систем. Встановлено, що масове впровадження інтерактивних систем стримується низкою технологічних бар'єрів: високою вартістю та трудомісткістю розробки, складністю адаптації інженерних даних без використання ручного 3D-моделювання, а також труднощами стабільної мережевої синхронізації в умовах обмеженої пропускної здатності. Показано, що існуючі засоби візуального моделювання (зокрема нотації сімейства BPMN) позбавлені вбудованих інструментів формальної верифікації сценаріїв. Визначено мету та завдання дослідження.
2. **Запропоновано структуру та спосіб представлення** віртуальних навчальних 3D-моделей на основі інформаційної моделі за парадигмою «Шаблон-Екземпляр». Розширено можливості об'єктно-орієнтованого наслідування на архітектуру ієрархічних графів 3D-моделей та інтегровано механізм фіксації залежностей (Dependency Pinning), що усуває ризик деструктивного каскадного ефекту при оновленнях. Розроблено механізм ієрархічного блокування (Locked Flag), що дозволяє встановлювати захист від змін на різних рівнях

вкладеності (від окремої властивості до 3D-моделі цілком разом із її дочірніми елементами), що гарантує детермінованість логіки під час виконання сценарію.

3. **Розроблено формальну модель** рольової взаємодії (MPV) у віртуальному середовищі, яка визначає правила та обмеження спільних дій кількох користувачів з однаковими або різними ролями. Модель базується на апараті ієрархічних мереж Петрі та формалізує сценарій як орієнтований дводольний граф, що динамічно пов'язує дискретні стани 3D-моделей із цілеспрямованими діями конкретних ролей. Відхід від класичних моделей із єдиним глобальним станом на користь динамічних маркувань дозволив забезпечити паралельність дій користувачів, а також інтегрувати алгоритми автоматичного виявлення логічних помилок (тупикових ситуацій та взаємних блокувань) безпосередньо на етапі створення сценарію.
4. **Дістав подальшого розвитку метод обробки** та представлення інженерних 3D-даних. Розроблено метод автоматичного видалення внутрішньої топології вузлів, які не задіяні у конкретному навчальному сценарії. На відміну від класичної «сліпої» геометричної децимації, запропонований метод на основі аналізу логіки сценарію замінює невикористовувані вузли на їхню зовнішню оболонку. Це суттєво знижує обчислювальне навантаження на систему візуалізації та підвищує захист пропрієтарних креслень обладнання від реверс-інжинірингу.
5. **Вперше запропоновано метод управління** обсягом інформації на сцені для забезпечення прийняттого когнітивного навантаження на користувача. Метод ґрунтується на теорії когнітивного навантаження і дозволяє адаптувати візуальне представлення сценарію відповідно до заданого рівня складності. Впровадження механізмів проактивного сповіщення інструктора, візуального приглушення нерелевантних

об'єктів та динамічного конвертування рутинних дій у мовчазні τ -переходи та авто-переходи дозволило утримувати обсяг інформації в межах пропускної здатності робочої пам'яті учня.

6. **Вперше розроблено аналітико-параметричний метод** реплікації гармонічних станів для розподіленої мережевої синхронізації навчальних комплексів. Обґрунтовано, що на відміну від класичних алгоритмів (стандарту DIS IEEE 1278.1), які спираються на поліноміальну екстраполяцію (Dead Reckoning) і зазнають інтенсивного кумулятивного зростання помилок при високочастотних осциляціях (вібраціях), запропонований метод базується на подієвій трансляції спектральних параметрів (частоти, амплітуди, мітки часу), що робить обсяг мережевого трафіку інваріантним до частоти коливань об'єкта. А використання глобальної часової мітки забезпечує збереження фазової узгодженості в умовах флуктуацій мережевої затримки (джиттеру), гарантуючи синхронне сприйняття високочастотних динамічних процесів та аварійних режимів усіма учасниками. Водночас делегування обчислень на рівень вершинних шейдерів графічного процесора забезпечує візуально-діагностичну еквівалентність відображення без залучення важких систем інженерного моделювання (CAE).
7. **Здійснено програмну реалізацію** розроблених моделей у вигляді прототипу функціональних модулів інформаційної технології. На його основі реалізовано проведення тестових випробувань, що підтвердило високу ефективність запропонованої технології, що характеризується такими попередніми оцінками:
- Впровадження візуального «No-Code» редактора дозволило скоротити час створення сценаріїв у 5–6 разів та знизити первинну собівартість розробки на 60–70%.

- Застосування методу реплікації гармонічних станів зменшило обсяг мережевого трафіку на 94% порівняно з традиційними методами.
- Реалізована архітектура клієнтського рендерингу відповідає концепції екологічних обчислень («Green Computing») і дозволила знизити енергоспоживання у 15–20 разів порівняно з технологіями хмарного стрімінгу.
- Експериментально підтверджено покращення показників ефективності формування сенсомоторних навичок у слухачів в середньому на 30% ($p < 0.01$).

Новизна та промислова придатність базових технічних рішень розробленої системи підтверджена Патентом України на корисну модель № 149786.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Абрамович, Р. П., Бальва, А. А., Самойлов, В. Д. (2014). Построение модели навигации для компьютерных тренажеров и приложений сценарного типа. *Электронное моделирование*, 36(1), 97–105.

Абрамович, Р. П., Бальва, А. О., Самойлов, В. Д. (2018). Інтегрована технологія проектування комп'ютерних засобів сценарного типу підготовки фахівців для енергопідприємств. *Електронне моделювання*, 40(2), 27–42.

Абрамович, Р. П., Самойлов, В. Д. (2019). Імітаційно-технологічний метод конструювання моделей тренажерів. *Моделювання та інформаційні технології*, 88, 129–133. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3859665>

Абрамович, Р. П., Самойлов, В. Д. (2021). *Технології конструювання комп'ютерних систем підготовки персоналу в енергетиці: монографія*. Прометей.

Бальва, А. О., Абрамович, Р. П., Самойлов, В. Д. (2019). Комп'ютерні сценарно-педагогічні технології розробки тренажерних систем для енергетичної галузі. *Моделювання та інформаційні технології*, 89, 98–106. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3860744>

Плетяний, І. В., Самойлов, В. Д., Чьочь, В. В. (2023). Проектування локальних тренажерів на основі сценарно-імітаційного моделювання. *Ядерна та радіаційна безпека*, 4(100), 49–56. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).05)

Самойлов, В. Д., Абрамович, Р. П., Лепатьєв, А. О. (2020). Комп'ютерні технології розробки тренажерних систем для енергетичної галузі. *Електронне моделювання*, 42(3), 89–97. <https://doi.org/10.15407/emodel.42.03.089>

Самойлов, В. Д., Абрамович, Р. П., Тарановський, А. О. (2023). Перспективи побудови тестів контролю знань персоналу АЕС з використанням штучного інтелекту. *Ядерна та радіаційна безпека*, 3(99), 67–74. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).07)

Самойлов, В. Д., Нетлюх, О. П. (2009). Сценарные структуры ситуационных тренажеров. *Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 52, 130–139.

Шевченко, С. С. (2021). Інтерактивна автоматизована дистанційна навчально-тренувальна система. *Патент України на корисну модель № 149786*, Бюл. № 48.

Шевченко, С. С. (2023a). Інтерактивні автоматизовані дистанційні навчально-тренувальні системи як важлива ланка у резильєнтності критичної інфраструктури. *Матеріали наук.-практ. конф. «Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023»* (с. 102–103). Київ.

Шевченко, С. С. (2023b). Вибір технологій для створення інтерактивних автоматизованих дистанційних навчально-тренувальних систем. *Матеріали наук.-практ. конф. «Технології створення і використання засобів підготовки персоналу на об'єктах критичної інфраструктури – 2023»* (с. 32–34). Київ.

Шевченко, С. С. (2023c). Підвищення кваліфікації персоналу як засіб покращення безпеки енергетики у цифрову епоху. *Матеріали V наук.-практ. конф. «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації»* (с. 117–119). Київ.

Шевченко, С. С. (2023d). Підвищення ефективності використання діагностичної інформації шляхом втілення інтерактивної системи навчання персоналу АЕС. *Матеріали наук.-практ. конф. «Технічна діагностика обладнання АЕС»* (с. 55–56). Київ.

Шевченко, С. С. (2024a). Питання безпеки контенту та вихідних матеріалів у інтерактивних навчальних системах. *Матеріали XLII наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова* (с. 52–53). Київ.

Шевченко, С. С. (2024b). Інтерактивні автоматизовані дистанційні навчально-тренувальні системи як інструмент покращення безпеки

енергетики у цифрову епоху. *Матеріали VI міжнар. конф. «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»* (с. 222–224). Київ.

Шевченко, С. С. (2025a). Алгоритмічне забезпечення верифікації та виконання кооперативних сценаріїв у розподілених тренажерних системах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*, 2(10), 142–149. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-02-10-18>

Шевченко, С. С. (2025b). Комплексний підхід та модель ролевої взаємодії при проектуванні кооперативних сценаріїв в інтерактивних навчально-тренувальних системах. *Електронне моделювання*, 47(5), 75–86. <https://doi.org/10.15407/emodel.47.05.075>

Шевченко, С. С. (2025c). Моделювання сценаріїв кібератак в інтерактивних 3D-середовищах як інструмент підвищення кіберстійкості персоналу енергетичних підприємств. *Матеріали наук.-практ. конф. «Кібербезпека енергетики»* (с. 55–56). Київ.

Шевченко, С. С. (2025d). Синхронізоване кооперативне навчання як інструмент підвищення ефективності командної роботи в енергетиці. *Матеріали XLIII наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова* (с. 71–73). Київ.

Шевченко, С. С., Винничук, С. Д. (2024). Роль автоматизованих навчальних платформ у забезпеченні стійкості динамічних систем до зовнішніх змін. *Матеріали наук.-практ. конф. «Резильєнтність динамічних систем»* (с. 128–129). Київ.

Abate, A., Bogomolov, S., Edwards, A., et al. (2024). Safe Reach Set Computation via Neural Barrier Certificates. *IFAC-PapersOnLine*, 58(11), 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.433>

Alcaraz, C., Guzman, H., Lopez, J. M. (2026). Adaptive Digital Twin: Protection, deception, and testing. *Future Generation Computer Systems*, 179, 108357. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108357>

Alcaraz, C., Lopez, J. M. (2022). Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 24(3), 1475–1503. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3171465>

Alcaraz, C., Meskini, I. H., Lopez, J. M. (2025). Digital twin communities: an approach for secure DT data sharing. *International Journal of Information Security*, 24(1). <https://doi.org/10.1007/s10207-024-00912-1>

Al-kfairy, M. (2025). Greening the Virtual: An Interdisciplinary Narrative Review on the Environmental Sustainability of the Metaverse. *Sustainability*, 17, 7269. <https://doi.org/10.3390/su17167269>

Ayache, J., et al. (2025). Rendering Togetherness: Embodied Social Synchronization in Multi-User VR. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 696–705. <https://doi.org/10.1109/ISMAR67309.2025.00079>

Becher, A., Angerer, J., Grauschopf, T. (2020). Negative effects of network latencies in immersive collaborative virtual environments. *Virtual Reality*, 24(3), 369–383. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00395-9>

Benford, S., Fahlén, L. (1993). A Spatial Model of Interaction in Large Virtual Environments. *Proceedings of the Third European Conference on Computer-Supported Cooperative Work (ECSCW '93)*, 109–124. <https://doi.org/10.5555/1241934.1241942>

Benhabbour, I., Bromberg, Y. D., Dacier, M., et al. (2023). Attacks on tomorrow's virtual world. *Proceedings of the 53rd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks - Supplemental Volume (DSN-S)*, 105–110. <https://doi.org/10.1109/DSN-S58398.2023.00033>

Bernabei, M., Patriarca, R. (2026). Catching Adaptive Patterns: From the Theory of Graceful Extensibility to Empirical Findings in a Simulation Platform. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1605, 227–239. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03722-0_19

Bisson, I., Bluntzer, J.-B., Mahdjoub, M., et al. (2025). Collaborative design process of immersive professional training software: industrial use case for an immersive risk hunt application. *Procedia CIRP*, 136, 868–873. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.148>

Boopathy, P., Deepa, N., Maddikunta, P. K. R., et al. (2025). The Metaverse for Industry 5.0 in NextG Communications: Potential Applications and Future Challenges. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 6, 4–24. <https://doi.org/10.1109/OJCS.2024.3497335>

Borowski, J., Rudolph, S. (2026). Graph-Based Design Languages for Engineering Automation: A Formula Student Race Car Case Study. *Vehicles*, 8(1), 24. <https://doi.org/10.3390/vehicles8010024>

Burova, A., Mäkelä, J., Heinonen, H., et al. (2022). Asynchronous industrial collaboration: How virtual reality and virtual tools aid the process of maintenance method development and documentation creation. *Computers in Industry*, 140, 103663. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103663>

Carlsson, C., Hagsand, O. (1993). DIVE: A Multi-User Virtual Reality System. *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS)*, 394–400. <https://doi.org/10.1109/VRAIS.1993.380753>

Cassola, F., Pinto, M., Mendes, D., et al. (2021). Immersive authoring of virtual reality training. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 633–634. <https://doi.org/10.1109/VRW52623.2021.00199>

Chae, C.-H., Ko, K.-H. (2024). Development of Physics-Based Virtual Training Simulator for Inspections of Steel Transmission Towers. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 19, 1943–1953. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01692-9>

Claude, G., Gouranton, V., Bouville Berthelot, R., et al. (2014). Short paper: #Seven, a sensor effector based scenarios model for driving collaborative

virtual environment. *Proceedings of ICAT-EGVE*, 63–66.
<https://doi.org/10.2312/ve.20141366>

Cox, J., Wong, K. C. (2019). Predictive feedback augmentation for manual control of an unmanned aerial vehicle with latency. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 11, 1–9. <https://doi.org/10.1177/1756829319869645>

Craven, C., et al. (2025). The Development of a No-Code VR Authoring Platform for Post-Secondary Educators. *Extended Reality: International Conference, XR Salento 2025*, 182–190. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97769-5_14

Dalal, Y. M., Supreeth, S., Rohith, S. V. S., et al. (2026). Towards smarter IoT through taxonomy and prospective directions for microservices placement in fog computing paradigms. *Discover Artificial Intelligence*, 6(1).
<https://doi.org/10.1007/s44163-025-00601-5>

Denisov, M. O., Yakovina, I. N., Burov, I. O. (2023). Using Mixed Reality for Development of Instruction for Industrial Unit Maintenance. *Proceedings of IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 1850–1854.
<https://doi.org/10.1109/EDM58354.2023.10225159>

Dewberry, N. K., AlHmoud, I. W., Benton, K., et al. (2025). A Real-Time VR-Enabled Digital Twin Framework for Multi-User Interaction in Industry 4.0. *Manufacturing Letters*, 44, 1486–1497.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.168>

Du, J., Yu, F. R., Lu, G., et al. (2020). MEC-Assisted Immersive VR Video Streaming over Terahertz Wireless Networks: A Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 9517–9529.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3003449>

Duarte Jr., E. P., Pozo, A. T. R., Beltrani, P. (2020). Smart Reckoning: Reducing the traffic of online multiplayer games using machine learning for

movement prediction. *Entertainment Computing*, 33, 100336. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2019.100336>

Erel-Ozcevik, M., Bozkaya, E. (2026). Secure computation offloading for data leakage prevention in digital twin edge networks. *Cluster Computing*, 29(3). <https://doi.org/10.1007/s10586-026-05950-z>

Evain, A., Fertier, A., Halse, S. E., et al. (2023). A Framework for virtual training in a crisis context and a focus on the animation component: the gamemaster workshop. *Proceedings of the 56th HICSS*, 1788–1797. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2023.225>

Ferretti, I., Zanoni, S., Costigliola, M. (2025) Building Information Modelling (BIM) and Virtual/Augmented Reality (VR/AR) for Advanced Training Tools: An Industry 5.0 Application – A Review. *Proceedings of the 15th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*, 320–328. <https://doi.org/10.5220/0013564800003970>

Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. *Sensors*, 21(17), 5745. <https://doi.org/10.3390/s21175745>

García-Molina, D. F., Mercado-Colmenero, J. M., Pabuena-García, A. J., et al. (2026). Augmented Reality for Machinery Layout Optimisation in Olive Oil Mills: An Innovative Approach. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 18, 41–58. https://doi.org/10.1007/978-3-032-08108-7_4

Giannini, F., Lupinetti, K., Monti, M., et al. (2022). A Customizable Immersive Training System for Operators of Dangerous Equipment. *Chemical Engineering Transactions*, 91, 349–354. <https://doi.org/10.3303/CET2291059>

Guigon, G., Muratet, M., Vermeulen, M., et al. (2025). Modelling and Verification with Petri Nets of Asymmetric Role-Playing Learning Scenarios.

Lecture Notes in Computer Science, 15348, 368–374.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-78269-5_37

Hamidi, M., Chetouani, A., El Haziti, M., et al. (2019). Blind robust 3D mesh watermarking based on mesh saliency and wavelet transform for copyright protection. *Information*, 10(2), 67. <https://doi.org/10.3390/info10020067>

Hare, R., Tang, Y. G. (2022). Petri Nets and Hierarchical Reinforcement Learning for Personalized Student Assistance in Serious Games. *Proceedings of the International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)*, 733–738. <https://doi.org/10.1109/ICCSI55536.2022.9970680>

Haus, M., Rooney, C., Barnett, J., et al. (2012). Evaluating the effect of startling and surprising events in immersive training systems for emergency response. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2467–2471. <https://doi.org/10.1177/1071181312561502>

Hu, A., Pennati, L., Peng, I. B., et al. (2025). Physics-Aware Compression of Plasma Distribution Functions with GPU-Accelerated Gaussian Mixture Models. *Lecture Notes in Computer Science*, 15905, 33–47. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97632-2_3

Hussain, T. S., Moffitt, K., Feurzeig, W., et al. (2010). Development of Game-Based Training Systems: Lessons Learned in an Inter-Disciplinary Field in the Making. *Serious Game Design and Development: Technologies for Training and Learning*, 47–80. <https://doi.org/10.4018/978-1-61520-739-8.ch004>

Isingizwe, J., Eiris, R., Al-Bayati, A. J. (2024). Enhancing safety training engagement through immersive storytelling: A case study in the residential construction. *Safety Science*, 179, 106631. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106631>

Iturrieta, M., Calderón, J. F., Rojas, L. A. (2024). Modeling a Workflow-Based Design Specification for Learning with Flexibility Characteristics, Absence of Deadlocks, and Achievability of Each State in TEL Applications.

Lecture Notes in Computer Science, 14704, 84–96. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61305-0_6

Jacquemin, P. H., Gräf, M., Mehler, M. F., et al. (2025). Exploring Mental Workload Across Different Levels of Immersion: Augmented Reality for Assembly Training within the Industrial Metaverse. *Proceedings of the 58th Hawaii International Conference on System Sciences*, 3972–3981. <https://doi.org/10.24251/hicss.2025.478>

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., et al. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3, 422–440. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>

Kiyokawa, T., Harada, K., Wan, W., et al. (2026). Many-objective-optimized semi-automated robotic disassembly sequences. *Robotics and Autonomous Systems*, 197, 105301. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.105301>

Korečko, Š., Sobota, B., Mattová, M., et al. (2022). Petri-Net-Driven Educational Scenarios in Web-Based Extended Reality. *Proceedings of the 2022 IEEE 16th International Scientific Conference on Informatics*, 163–167. <https://doi.org/10.1109/Informatics57926.2022.10083401>

Koteleva, N., Korolev, N., Kovalchuk, M. (2025). Industrial Metaverse and Technical Diagnosis of Electric Drive Systems. *Applied Sciences*, 15(23), 12699. <https://doi.org/10.3390/app152312699>

Kuts, V., Otto, T., Bondarenko, Y., et al. (2020). Digital twin: Collaborative virtual reality environment for multi-purpose industrial applications. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2B-2020. <https://doi.org/10.1115/IMECE2020-23390>

Lestingi, L., Manglaviti, A., Marinaro, D., et al. (2024). Analyzing the impact of human errors on interactive service robotic scenarios via formal verification. *Software and Systems Modeling*, 23(2), 473–502. <https://doi.org/10.1007/s10270-023-01125-1>

Li, J., Yu, R., Gu, L., et al. (2019). The three dimensional immersive training platform for China initiative accelerator driven subcritical system. *Proceedings of ICONE*.

Li, X., Gao, Q., Zhang, Z., et al. (2012). Collaborative virtual maintenance training system of complex equipment based on immersive virtual reality environment. *Assembly Automation*, 32(1), 72–85. <https://doi.org/10.1108/01445151211198737>

Lindblom, A., Laine, T. H., Rossi, H. S. (2021). Investigating Network Performance of a Multi-user Virtual Reality Environment for Mining Education. *Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IMCOM51814.2021.9377356>

Liu, S., Xu, X., Claypool, M. C. (2022). A Survey and Taxonomy of Latency Compensation Techniques for Network Computer Games. *ACM Computing Surveys*, 54(11s), 1–34. <https://doi.org/10.1145/3519023>

Lorenz, M., Spranger, M., Riedel, T., et al. (2016). CAD to VR – A Methodology for the Automated Conversion of Kinematic CAD Models to Virtual Reality. *Procedia CIRP*, 41, 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.115>

Macedonia, M. R., Zyda, M. J., Pratt, D. R., et al. (1994). NPSNET: A network software architecture for large-scale virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(4), 265–287. <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.4.265>

Mariscal-Melgar, J. C. (2025). AI-Assisted Documentation: An Implosion Animation Method for CAD Designs. *Computers*, 14(12), 521. <https://doi.org/10.3390/computers14120521>

Martínez-Gutiérrez, A., Díez-González, J., Perez, H., et al. (2024). Towards industry 5.0 through metaverse. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102764. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102764>

Moskvin, A., Moskvina, M., Kuzmichev, V. (2026). Optimising 3D models of historical clothing: A data-driven framework for balancing accuracy and performance. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 40, e00487. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00487>

Mulero-Perez, D., Zambrano-Serrano, B., Ruiz Zúñiga, E., et al. (2025). Enhancing Robotics Education Through XR Simulation: Insights from the X-RAPT Training Framework. *Applied Sciences*, 15(18), 10020. <https://doi.org/10.3390/app151810020>

Odeh, J. O., Yang, X. (2024). Industrial-Internet-of-Things-Based Digital Twin and Metaverse Privacy and Security Measures for a Trustworthy Industrial Metaverse Ecosystem. *IT Professional*, 26(6), 28–34. <https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3486115>

Partarakis, N., Zabulis, X., Zourarakis, D., et al. (2025). Physics-Based Tool Usage Simulations in VR. *Multimodal Technologies and Interaction*, 9(29). <https://doi.org/10.3390/mti9040029>

Peitso, L., Brutzman, D. (2020). Defeating lag in network-distributed physics simulations. *Graphical Models*, 111, 101075. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2020.101075>

Peng, F., Dai, T., Long, M. (2026). A Semi-fragile Reversible Watermarking for 3D Models Using Quantization Interval Division Modulation. *Communications in Computer and Information Science*, 2639, 395–409. https://doi.org/10.1007/978-981-95-3480-7_29

Peniche, A., Díaz, C., Trefftz, H., et al. (2011). An immersive virtual reality training system for mechanical assembly. *International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, MEQAPS – Proceedings*, 109–113.

Psotka, J. (1995). Immersive training systems: Virtual reality and education and training. *Instructional Science*, 23, 405–431. <https://doi.org/10.1007/BF00896880>

Raman, R., Mandal, S., Gunasekaran, A., et al. (2025). Transforming business management practices through metaverse technologies: A Machine Learning approach. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2025.100335>

Rao, V. S., Babu, G. R. (2026). Energy-efficient task offloading approach incorporating modified Grey Wolf Optimization with the Seagull Algorithm towards 5G-IOT MEC. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 50, 101304. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2026.101304>

Razzaq, M., Ahmad, J. (2015). Petri Net and Probabilistic Model Checking Based Approach for the Modelling, Simulation and Verification of Internet Worm Propagation. *PLoS ONE*, 10(12), e0145690. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145690>

Regal, G., Pretolesi, D., Schrom-Feiertag, H., et al. (2023). Challenges in Virtual Reality Training for CBRN Events. *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(88). <https://doi.org/10.3390/mti7090088>

Romagnoli, L., Proietti Mattia, G., Beraldi, R. (2023). A Study on Energy Efficiency in Edge-assisted VR Applications with Meta Quest 2 for Disaster Management. *2023 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICT-DM58371.2023.10286920>

Rosati, R., Senesi, P., Lonzi, B., et al. (2024). An automated CAD-to-XR framework based on generative AI and Shrinkwrap modelling for a User-Centred design approach. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102848. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102848>

Rovaglio, M., Calder, R., Richmond, P. (2012). Bridging the Experience Gap – How do we migrate Skills and Knowledge between the Generations? *Computer Aided Chemical Engineering*, 30, 1407–1411. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59520-1.50140-8>

Samaniego-Franco, J. B., Sarango-Lapo, C. P., Ríos-Castillo, L. E., et al. (2022). Development of a multi-user audience simulator prototype. *Proceedings of the Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1–6. <https://doi.org/10.23919/CISTI54924.2022.9820470>

Sandhu, R. S., Coyne, E. J., Feinstein, H. L., Youman, C. E. (1996). Role-Based Access Control Models. *IEEE Computer*, 29(2), 38–47. <https://doi.org/10.1109/2.485845>

Shevchenko, S. S. (2023). Creation of interactive automated educational and training systems. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023): тези 23-ї міжнар. наук.-техн. конф.*, Харків: HTУ "ХПІ", 102–104.

Shevchenko, S., Shevchenko, S. (2024). Increasing the Operational Safety of NPP Pumping Equipment by Using Interactive Automated Remote Educational and Training Systems. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(101), 19–27. [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.1\(101\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.1(101).02)

Shevchenko, T., Shams Esfandabadi, Z., Ranjbari, M., et al. (2024). Metrics in the circular economy: An inclusive research landscape of the thematic trends and future research agenda. *Ecological Indicators*, 165, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112182>

Singhal, S., Zyda, M. (1999). *Networked Virtual Environments: Design and Implementation*. ACM Press.

Solanes, J. E., Francés-Falip, A., Gracia, L., et al. (2026). Bridging Virtual and Physical Realms in Industrial Metaverses for Enhanced Process Control. *Information*, 17(1), 71. <https://doi.org/10.3390/info17010071>

Soorya, V. R., Bhat, S. S., Shaik, S., et al. (2024). Advanced Latency Compensation Techniques for Seamless Online Gaming Experiences. *Proceedings of the 9th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/I2CT61223.2024.10543857>

Su, Z., He, X., Wang, W., et al. (2025). Crossport: a Cloud-Edge-End Microservice Architecture for Collaborative Rendering in Metaverse Services.

IEEE Transactions on Services Computing.
<https://doi.org/10.1109/TSC.2025.3633668>

Tang, Y., Gu, H. (2010). CAD Model's Simplification and Conversion for Virtual Reality. *2010 Third International Conference on Information and Computing*, 265–268. <https://doi.org/10.1109/ICIC.2010.338>

Tantawi, K., Fidan, I., Huseynov, O., et al. (2025). Advances in industry 4.0: from intelligentization to the industrial metaverse. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19, 1461–1472. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01750-0>

Tao, Y., Wang, C. Y., Wilson, A. D., et al. (2023). Embodying Physics-Aware Avatars in Virtual Reality. *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–15. <https://doi.org/10.1145/3544548.3580979>

Trabelsi, A., Grégoire, Y., Morin, R. (2026). XR Platform: An AI-Driven XR Training Framework for Industrial Machine Operation. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 387–400. https://doi.org/10.1007/978-3-032-10951-4_25

Ulmer, J., Braun, S., Lai, C. Y., et al. (2019). Generic integration of VR and AR in product lifecycles based on CAD models. *Journal on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 17(2), 25–30.

Verma, N., Radhakrishnan, D., Ray, D. (2025). Greening Digital Healthcare Balancing Act for Sustainable Future. *Optimization Tools and Techniques for Enhanced Computational Efficiency*, 81–124. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6885-5.ch004>

Viola, R., Irazola, M., Juárez, J. R., et al. (2025). Energy consumption assessment of a Virtual Reality Remote Rendering application over 5G networks. *arXiv preprint*, arXiv:2510.25357. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.25357>

Wang, B., Zheng, L., Wang, Y., et al. (2024). Towards the industry 5.0 frontier: Review and prospect of XR in product assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 777–811. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.05.002>

Wang, J., Hu, Y., Yang, X. (2022). Multi-person Collaborative Augmented Reality Assembly Process Evaluation System Based on HoloLens. *Lecture Notes in Computer Science*, 13318, 369–380. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06015-1_25

Wang, Y., Su, Z., Guo, S., et al. (2023). A Survey on Digital Twins: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Future Prospects. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(17), 14965–14987. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3263909>

Xiao, X., Roy, R., Omidyeganeh, M., et al. (2025). Industrial Metaverse design methodologies: a comprehensive literature review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1–31. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2025.2544545>

Xu, Z., Zhang, X., Zhang, L., et al. (2026). URDF-X: Enhancing the Physical Simulation of Articulated Objects via the Collision Mesh Optimization and Joint Parameter Correction. *Lecture Notes in Computer Science*, 16282, 225–239. https://doi.org/10.1007/978-981-95-5740-0_16

Yu, C., Zhuang, Y., Pan, Y. (2004). Role-based speculative concurrency control scheme for collaborative virtual environment. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 38(6), 658–664.

Yuan, G., Zhou, M., Liu, F., et al. (2024). Physics-aware cross-domain fusion aids learning-driven computer-generated holography. *Photonics Research*, 12(12), 2747–2756. <https://doi.org/10.1364/PRJ.527405>

Zahid, A., Ferraro, A., Petrillo, A., et al. (2025). Exploring the Role of Digital Twin and Industrial Metaverse Technologies in Enhancing Occupational Health and Safety in Manufacturing. *Applied Sciences*, 15(15), 8268. <https://doi.org/10.3390/app15158268>

Zhang, B., Sun, X., Li, Y., et al. (2024). Research on three-dimensional visualization technology based on electric power meta-universe technology. *Proceedings of 3rd International Conference on Energy and Power Engineering, Control Engineering (EPECE)*, 187–192. <https://doi.org/10.1109/EPECE63428.2024.00041>

Zhang, Z., Zhang, Y., Zhao, X., et al. (2025). Deadlock-Aware Control for Multirobot Coordination With Multiple Safety Constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 41, 5209–5228. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3600159>

Zhong, W., Zhou, J., Sun, T., et al. (2024). A Verification Framework for Time-Triggered Networks Based on Timed Colored Petri Net. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 43(7), 2112–2125. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2024.3355708>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Shevchenko T., Shams Esfandabadi Z., Ranjbari M., Saidani M., Mesa J., **Shevchenko S.** et al. Metrics in the circular economy: An inclusive research landscape of the thematic trends and future research agenda. *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 165. 112182. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112182. (Scopus, Q1)

Внесок Шевченка Станіслава Сергійовича: брав участь у розробці методології дослідження та обґрунтуванні впливу цифрових інструментів на показники ресурсоощадності та екологічної ефективності.

2. **Shevchenko S.**, Shevchenko S. Increasing the Operational Safety of NPP Pumping Equipment by Using Interactive Automated Remote Educational and Training Systems. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. Vol. 1(101). P. 19–27. DOI: 10.32918/nrs.2024.1(101).02. (Scopus, Q3)

Внесок Шевченка Станіслава Сергійовича: розроблено архітектуру інтерактивної системи дистанційного навчання для персоналу АЕС та запропоновано методику візуалізації насосного обладнання.

3. **Шевченко С. С.** Комплексний підхід та модель ролевої взаємодії при проектуванні кооперативних сценаріїв в інтерактивних навчально-тренувальних системах. *Електронне моделювання*. 2025. Т. 47, № 5. С. 75–86. DOI: 10.15407/emodel.47.05.075. (Фахове видання, категорія «Б»)

4. **Шевченко С. С.** Алгоритмічне забезпечення верифікації та виконання кооперативних сценаріїв у розподілених тренажерних

системах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2025. № 2 (10). С. 142–149. DOI: 10.36994/2788-5518-2025-02-10-18. (Фахове видання, категорія «Б»)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. **Shevchenko S. S.** Creation of interactive automated educational and training systems. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023)*: тези 23-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 2023 р.). Харків: НТУ "ХПІ", 2023. С. 102–104.
2. **Шевченко С. С.** Інтерактивні автоматизовані дистанційні навчально-тренувальні системи як важлива ланка у резильєнтності критичної інфраструктури. *Резильєнтність критичної інфраструктури – 2023*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 21 червня 2023 р.). Київ, 2023. С. 102–103.
3. **Шевченко С. С.** Вибір технологій для створення інтерактивних автоматизованих дистанційних навчально-тренувальних систем. *Технології створення і використання засобів підготовки персоналу на об'єктах критичної інфраструктури – 2023*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 8 листопада 2023 р.). Київ, 2023. С. 32–34.
4. **Шевченко С. С.** Підвищення кваліфікації персоналу як засіб покращення безпеки енергетики у цифрову епоху. *Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації*: матеріали V наук.-практ. конф. (м. Київ, 22 листопада 2023 р.). Київ, 2023. С. 117–119.
5. **Шевченко С. С.** Підвищення ефективності використання діагностичної інформації шляхом втілення інтерактивної системи навчання персоналу АЕС. *Технічна діагностика обладнання АЕС*: матеріали наук.-практ. конф. (м. Київ, 6 грудня 2023 р.). Київ, 2023. С. 55–56.

6. **Шевченко С. С.** Питання безпеки контенту та вихідних матеріалів у інтерактивних навчальних системах. *XLII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України* (м. Київ, 15 травня 2024 р.). Київ, 2024. С. 52–53.
7. **Шевченко С. С.** Інтерактивні автоматизовані дистанційні навчально-тренувальні системи як інструмент покращення безпеки енергетики у цифрову епоху. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику: матеріали VI міжнар. конф.* (м. Київ, 27 вересня 2024 р.). Київ, 2024. С. 222–224.
8. **Шевченко С. С., Винничук С. Д.** Роль автоматизованих навчальних платформ у забезпеченні стійкості динамічних систем до зовнішніх змін. *Резильєнтність динамічних систем: матеріали наук.-практ. конф.* (м. Київ, 27 грудня 2024 р.). Київ, 2024. С. 128–129.

Внесок Шевченка Станіслава Сергійовича: обґрунтовано роль автоматизованих платформ у забезпеченні резильєнтності динамічних систем.
9. **Шевченко С. С.** Синхронізоване кооперативне навчання як інструмент підвищення ефективності командної роботи в енергетиці. *XLIII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України* (м. Київ, 14 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 71–73.
10. **Шевченко С. С.** Моделювання сценаріїв кібератак в інтерактивних 3D-середовищах як інструмент підвищення кіберстійкості персоналу енергетичних підприємств. *Кібербезпека енергетики: матеріали наук.-практ. конф.* (м. Київ, 28 травня 2025 р.). Київ, 2025. С. 55–56.

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати
дисертації:**

1. Пат. 149786 Україна, МПК (2021.01) G09B 19/00. Інтерактивна автоматизована дистанційна навчально-тренувальна система / **С. С. Шевченко**; заявник та патентовласник С. С. Шевченко. – № и 2021 05876; заявл. 19.10.2021; опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48.

**ДОДАТОК Б. Акти та довідки про використання (апробацію)
результатів дисертаційної роботи**



УКРАЇНА
АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
"КИЇВСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ТА
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ ІНСТИТУТ
"ЕНЕРГОПРОЕКТ"

№23 від 02.07.2026

ДОВІДКА

**про використання результатів дисертаційної роботи
«Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі
3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій»
Шевченка Станіслава Сергійовича, яка подається на здобуття наукового
ступеня доктора філософії**

Результати дисертаційної роботи аспіранта Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України Шевченка Станіслава Сергійовича на тему «Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій», яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії, було апробовано при виконанні проєктних робіт у частині застосування сучасного обладнання для потреб атомної енергетики.

Матеріали наукової роботи Шевченка С.С. у вигляді функціонального прототипу програмного комплексу використовувались працівниками підприємства при вивченні нюансів роботи та внутрішньої будови насосного обладнання на атомних станціях України. Використання розроблених автором алгоритмів візуального фокусування та динамічної оптимізації когнітивного навантаження (усунення візуального «шуму») дозволило експертам більш якісно та із меншими витратами часу проаналізувати складні багатокомпонентні вузли та виконати відповідне проєктування.

Голова правління



Сапожников Ю.А.

Товариство з обмеженою відповідальністю
**«КОНСТРУКТОРСЬКЕ БЮРО
«УКРСПЕЦМАШ»**

Україна, 40007, м. Суми,
вул. Промислова, 6
Тел. (0542) 770-664,
E-mail:
admin@kb-usm.com.ua
www.kb-usm.com.ua

№5/06-07 від 06.07.2026

АКТ

про апробацію та використання результатів дисертаційної роботи
Шевченка Станіслава Сергійовича на тему «Інформаційна технологія створення
інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту
насосів атомних станцій», яка подається на здобуття наукового ступеня доктора
філософії

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи аспіранта Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України Шевченка Станіслава Сергійовича на тему «Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій», яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії, було успішно апробовано при розробці цифрових інтерактивних 3D-інструкцій для навчання персоналу замовників роботі з обладнанням, що виробляється ТОВ «КБ «УКРСПЕЦМАШ»».

Використання прототипу тренажерної системи підтвердило високу ефективність запропонованого автором аналітико-параметричного методу для розподіленої мережевої синхронізації. Архітектура комплексу забезпечила стабільну кооперативну роботу спеціалістів у віртуальному середовищі з мінімальними вимогами до пропускної здатності інтернет-з'єднання, що дозволило оптимізувати процес дистанційного навчання персоналу.

Директор, ТОВ «КБ «УКРСПЕЦМАШ»
канд. техн. наук



О.С. Чернов



Система менеджменту якості відповідає
вимогам міжнародного стандарту ISO 9001:2015

АТ
«Сумський завод Енергомаш»

Україна, 40024, м. Суми,
вул. Юрія Ветрова, 4
тел./факс: +38 (0542) 25-00-53
+38 (0542) 78-70-88
e-mail: admin@gts-group.com.ua
web: www.energomash.sumy.ua



JSC
«Sumy plant «Energomash»

Ukraine, 40024, Sumy,
st. Yuria Vetrova, 4
tel/fax: +38 (0542) 25-00-53
+38 (0542) 78-70-88
e-mail: admin@gts-group.com.ua
web: www.energomash.sumy.ua

р/р UA053003350000000026008537692 в АТ «Райффайзен Банк» м.Київ,
код ЄДРПОУ: 00223208, ІПН: №002232018197, Свідоцтво платника податку: №100340527

№1 від 03.07.2026

АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи
Шевченка Станіслава Сергійовича на тему
«Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв
на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій»,
яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи аспіранта Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України Шевченка Станіслава Сергійовича на тему «Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій», яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії, було успішно використано у форматі дослідної експлуатації при підготовці навчальних матеріалів для персоналу замовників щодо роботи з обладнанням, що виробляється АТ «Сумський завод «Енергомаш».

При використанні розробленої інформаційної технології було встановлено її практичну ефективність: завдяки застосуванню парадигми «Шаблон-Екземпляр» та автоматизації процесу конструювання сценаріїв було значно скорочено час на виготовлення навчальних матеріалів інженерами підприємства, а також суттєво підвищено їх дидактичну якість та наочність.

Генеральний директор
АТ «Сумський завод «Енергомаш»



Юрій КОЩІЄНКО

ДОВІДКА №1 від 03.07.2026
про апробацію результатів дисертаційної роботи
Шевченка Станіслава Сергійовича на тему
«Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі
3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій»,
яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Результати дисертаційної роботи аспіранта Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України Шевченка Станіслава Сергійовича на тему «Інформаційна технологія створення інтерактивних сценаріїв на основі 3D-моделей з навчання спеціалістів з ремонту насосів атомних станцій», яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії, було успішно апробовано при створенні навчальних програм для працівників Державного науково-технічного центру з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ).

Результати апробації прототипу програмного комплексу довели можливість ефективного створення комплексних навчальних сценаріїв. Використання розроблених автором алгоритмів побудови та методів просторового фокусування дозволило підвищити дидактичну якість навчальних програм та ефективність формування професійних компетенцій у працівників ДНТЦ ЯРБ.

Голова комісії з перетворення

Ігор ШЕВЧЕНКО

Заступник директора з наукової та
інноваційної діяльності

Олексій ДИБАЧ



ДОДАТОК В. Формалізований опис алгоритмів та структур даних системи

В.1. Формальна структура навчального об'єкта

Абстрактна репрезентація інформаційної моделі даних (відповідно до п. 2.1.1), що реалізує парадигму «Шаблон-Екземпляр» та механізм контролю версій.

```
Structure AssetTemplate:
  ID_parent : Struct { UUID: String, Version: Integer }
  // Прив'язка до версії батьківського шаблону

  // 1. Геометрична складова (G)
  Geometry : Struct {
    MeshRef: URI, // Посилання на 3D-сітку в Asset Store
    IsBlackBox: Boolean // Результат автоматичного видалення
    внутрішньої топології вузлів
  }

  // 2. Властивості та стани (St)
  States : Struct {
    Metadata: Map<String, URI>,
    // Посилання на Tech Library (напр., "Manual" -> "db://tech/12")
    PhysicsProps: Struct { BaseMass: Float, MaterialRef: URI },
    // Статичні константи
    DynamicVariables: Map<String, Variant>
    // Динамічні стани: строки, числа, булеві
    // (напр., "Pressure": 120.5)
  }

  // 3. Функції реакцій (δ)
  Reactions : Map<TriggerEvent, ActionLibraryRef>
  // Зв'язок події (напр., onClick) зі скриптом у базі дій

  // 4. Кінематика та ієрархія (K)
  Kinematics : Struct {
    SceneGraph: Struct { ParentNode: Pointer, T_local: Matrix4x4 },
    // T_local зберігає поточні x,y,z та поворот
    Constraints: Struct { DoF: Vector3, Limits: MinMaxStruct },
    // Фізичні межі рухливості
    CurrentDynamics: Struct { Velocity: Vector3,
      AngularVelocity: Vector3 }
    // Поточний рух (анімація)
  }

  Locked : Boolean
  // Механізм ієрархічного блокування властивостей у Runtime
```

В.2. Псевдокод алгоритму клієнтської візуалізації мережевих параметрів

Абстрактний алгоритм процедурної деформації вершин для локальної реконструкції рухів на основі отриманих з мережі параметрів на рівні графічного конвеєра (відповідно до п. 3.5.2).

Algorithm 1: VertexDeformation_HarmonicOscillator

Input:

$\vec{v}$ – початковий локальний вектор координат вершини
 $\vec{n}$ – вектор нормалі до поверхні
 t – глобальний час симуляції
 $\vec{P}$ – вектор фізичних параметрів $\{A, f, \phi_v\}$

Output:

$\vec{v}'_{screen}$ – модифікована позиція вершини на екрані

```
1: procedure CalculateDeformation( $\vec{v}, \vec{n}, t, \vec{P}$ )
2:    $displacement \leftarrow \vec{P} \cdot A \cdot \sin(2\pi \cdot \vec{P} \cdot f \cdot t + \vec{P} \cdot \phi_v)$ 
3:    $\vec{v}' \leftarrow \vec{v} + (\vec{n} \cdot displacement)$ 
4:    $\vec{v}'_{screen} \leftarrow ProjectionMatrix \times ViewMatrix \times ModelMatrix \times \vec{v}'$ 
5:   return  $\vec{v}'_{screen}$ 
6: end procedure
```

В.3. Структура пакету параметричної реплікації

Специфікація корисного навантаження (Payload) для передачі через WebSocket, що оптимізує мережевий трафік (відповідно до п. 3.5.1).

Structure SyncPayload:

```
PacketType : Enum { SYNC_EVENT, STATE_SNAPSHOT }
Timestamp : Integer // Синхронізований час NTP (ms)
SequenceID : Integer // Контроль втрати пакетів
Entities : List <EntityUpdate>
```

Structure EntityUpdate:

```
ObjectID : UUID
LocalState : String // Напр., "ALARM_VIBRATION"
PhysicsParams : Struct {
    Frequency : Float
    Amplitude : Float
}
```

```

}
ReconciliationData : Struct {
    X_server : Vector3 // Еталонна позиція від сервера
    Velocity : Vector3
    // Для інтерполяції (Lerp) на клієнті
}

```

В.4. Структура JSON-маніфесту скомпільованого багатокористувацького сценарію

Нижче наведено структуру скомпільованого файлу конфігурації (маніфесту), який генерується візуальним «No-Code» редактором.

Структура файлу є програмною реалізацією теоретичного кортежу сценарію. Цей JSON-маніфест зчитується клієнтським модулем (Runtime Engine) для динамічної розгортки простору станів та ініціалізації мережі Петрі в оперативній пам'яті.

У наведеному прикладі формалізовано розглянутий у роботі сценарій демонтажу захисного кожуха насоса (із попереднім знеструмленням агрегату Електриком, застосуванням макросів Action_Pool для 12 болтів та Rendezvous для спільної дії двох Слюсарів).

```

{
  "scenario_metadata": {
    "id": "scn_5f8a9b2c_cns_repair",
    "name": "Ремонт ЦНС: Демонтаж захисного кожуха",
    "version": "1.0.0",
    "base_complexity_level": "Basic"
  },
  "roles": [
    { "role_id": "r_mechanic", "name": "Слюсар" },
    { "role_id": "r_electrician", "name": "Електрик" }
  ],
  "inventory": [
    { "item_id": "inv_wrench_10", "name": "Гайковий ключ 10мм",
    "total_count": 2 }
  ],
  "initial_marking": {
    "objects": {
      "Bolt_01": "S_Screwed",
      "Bolt_02": "S_Screwed",
      "Bolt_03": "S_Screwed",
      "Bolt_04": "S_Screwed",
      "Bolt_05": "S_Screwed",

```

```

    "Bolt_06": "S_Screwed",
    "Bolt_07": "S_Screwed",
    "Bolt_08": "S_Screwed",
    "Bolt_09": "S_Screwed",
    "Bolt_10": "S_Screwed",
    "Bolt_11": "S_Screwed",
    "Bolt_12": "S_Screwed",
    "Cover_Main": "S_Installed"
  },
  "environment": {
    "Power_Supply": "S_On"
  }
},

"target_marking": {
  "Cover_Main": "S_Removed"
},

"transitions": [
  {
    "id": "TR_00_Turn_Off_Power",
    "type": "Standard",
    "description": "Електрик знімає напругу з агрегату",
    "targets": ["Power_Supply"],
    "pre_condition": "S_On",
    "post_condition": "S_Off",

    "actor_requirement": {
      "role": "r_electrician",
      "count": 1
    },
    "cognitive_adaptation": {
      "auto_cascade_up_to_level": "None"
    },
    "action_library_ref": "Anim_Switch_Off"
  },
  {
    "id": "TR_01_Unscrew_Bolts",
    "type": "Action_Pool",
    "description": "Автоматичне розгортання в 12 паралельних переходів",
    "targets": [
      "Bolt_01", "Bolt_02", "Bolt_03", "Bolt_04", "Bolt_05", "Bolt_06",
      "Bolt_07", "Bolt_08", "Bolt_09", "Bolt_10", "Bolt_11", "Bolt_12"
    ],
    "pre_condition": "S_Screwed",
    "post_condition": "S_Unscrewed",

    "actor_requirement": {
      "role": "r_mechanic",
      "count": 1
    },
    "guard_condition": {
      "required_tool": "inv_wrench_10",
      "location": "In_Hand"
    },
    "dependencies": {
      "Power_Supply": "S_Off"
    },
    "cognitive_adaptation": {
      "auto_cascade_up_to_level": "Basic"
    }
  },

```

```

    "action_library_ref": "Anim_Unscrew_Z"
  },
  {
    "id": "TR_02_Remove_Cover",
    "type": "Rendezvous",
    "description": "Емерджентна точка синхронізації (спільна дія)",
    "targets": ["Cover_Main"],
    "pre_condition": "S_Installed",
    "post_condition": "S_Removed",

    "actor_requirement": {
      "role": "r_mechanic",
      "count": 2
    },
    "dependencies": {
      "Bolt_01": "S_Unscrewed",
      "Bolt_02": "S_Unscrewed",
      "Bolt_03": "S_Unscrewed",
      "Bolt_04": "S_Unscrewed",
      "Bolt_05": "S_Unscrewed",
      "Bolt_06": "S_Unscrewed",
      "Bolt_07": "S_Unscrewed",
      "Bolt_08": "S_Unscrewed",
      "Bolt_09": "S_Unscrewed",
      "Bolt_10": "S_Unscrewed",
      "Bolt_11": "S_Unscrewed",
      "Bolt_12": "S_Unscrewed",
      "Power_Supply": "S_Off"
    },
    "cognitive_adaptation": {
      "auto_cascade_up_to_level": "None"
    },
    "action_library_ref": "Anim_Move_Y_Up"
  }
]
}

```

ДОДАТОК Г. Приклади моделювання багатокористувацьких сценаріїв на базі Моделі Рольової Взаємодії (МРВ)

У даному додатку наведено графічну інтерпретацію роботи розробленої Моделі Рольової Взаємодії (МРВ) на базі апарату кольорових ієрархічних мереж Петрі для розв'язання типових завдань кооперативного навчання.

Г.1. Моделювання паралельних завдань та одночасного виконання

На рис. Г.1 (а-г) продемонстровано архітектуру та динаміку обробки кооперативного завдання (спільного зняття кришки, закріпленої масивом болтів) у вигляді чотирьох послідовних станів маркування мережі Петрі.

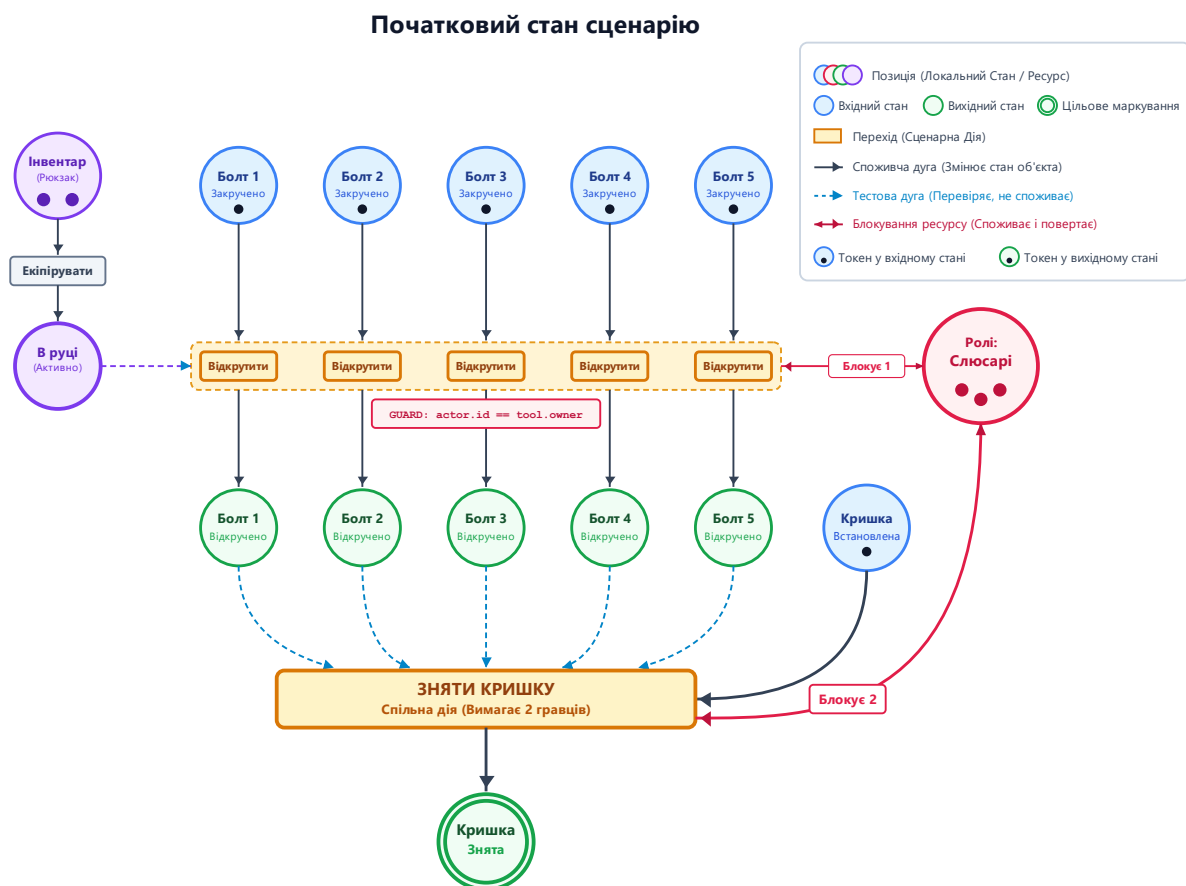


Рис. Г.1. а) Етап 1

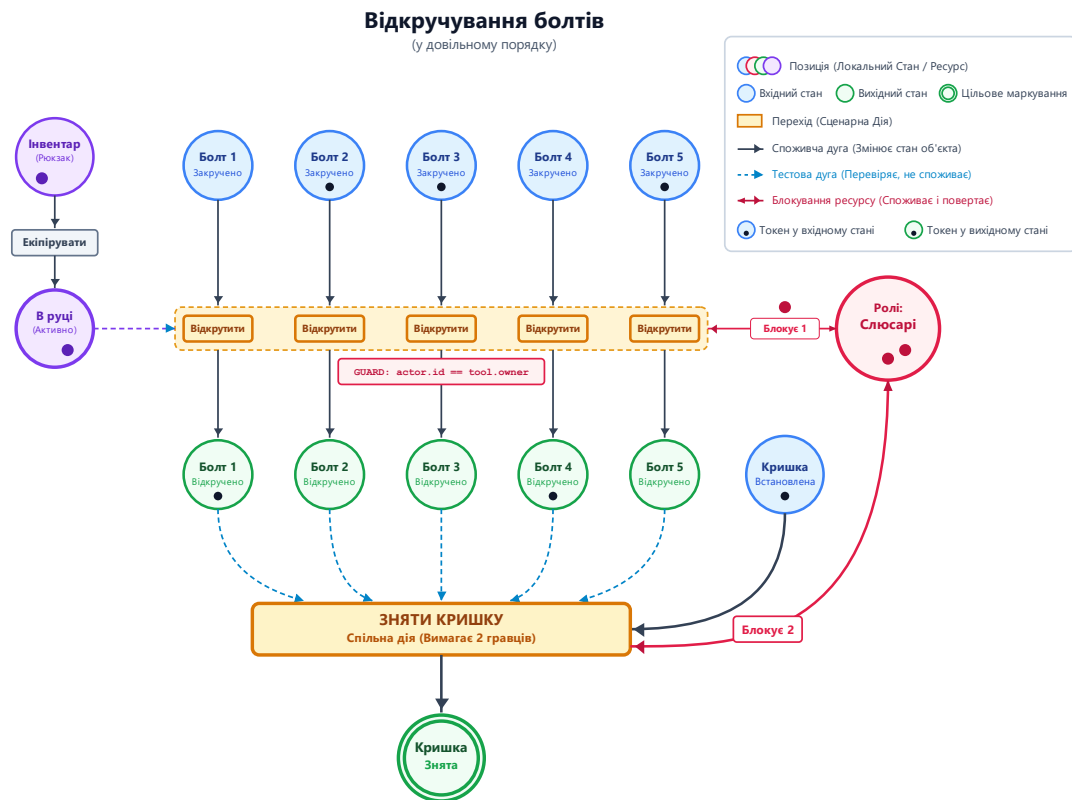


Рис. Г.1. б) Етап 2

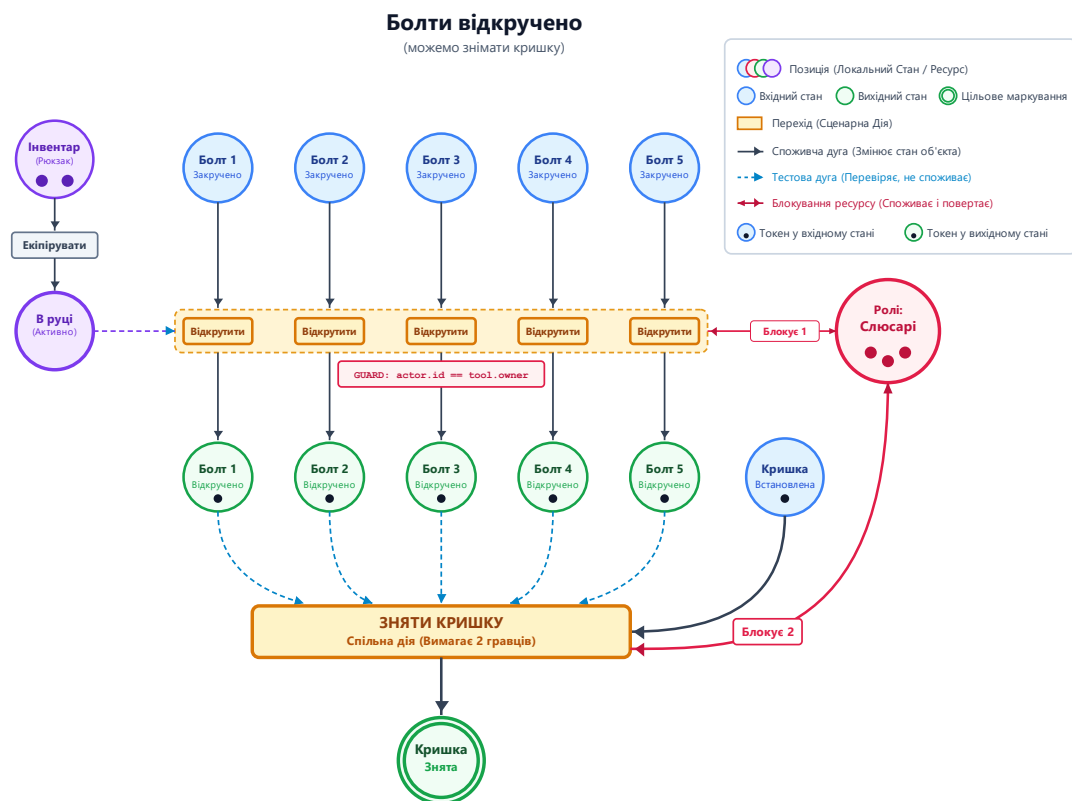
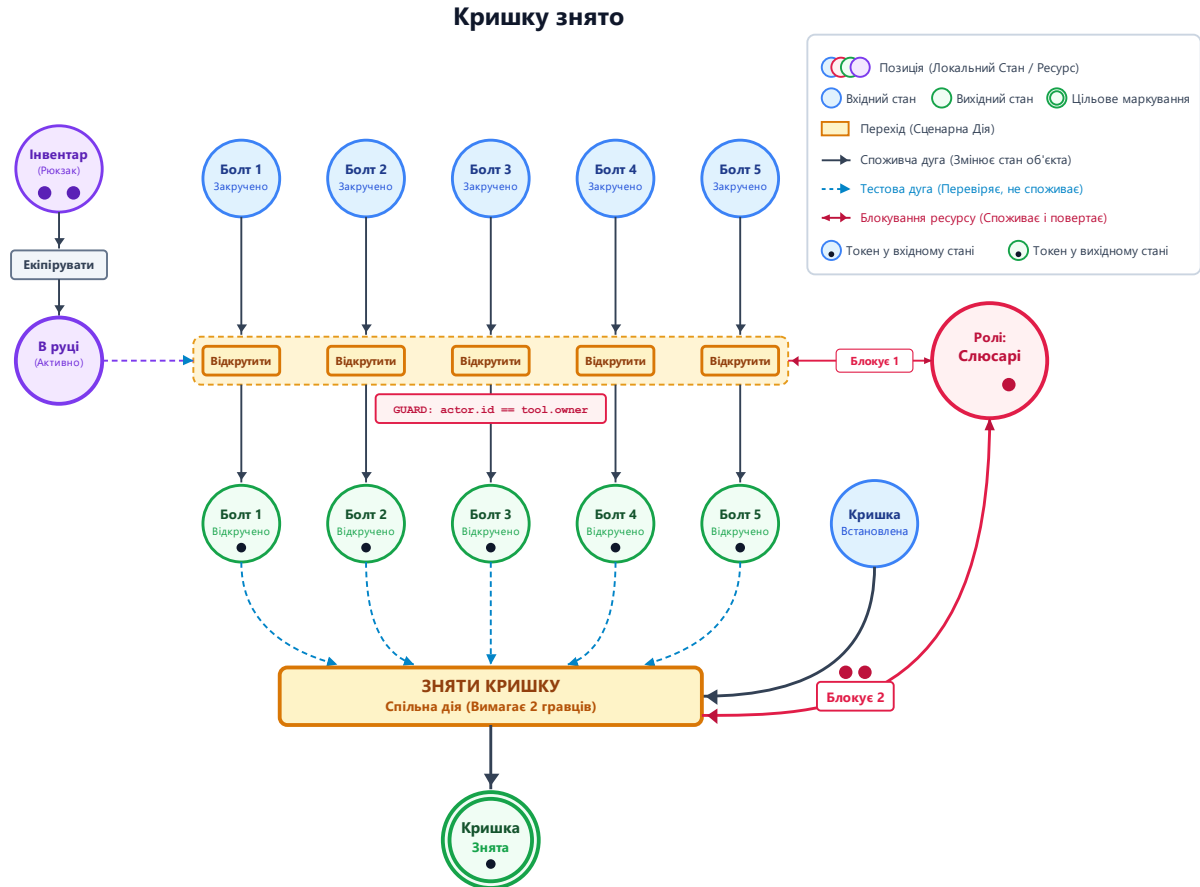


Рис. Г.1. в) Етап 3



Динаміка виконання сценарію (Runtime) ілюструє наступні механізми розробленої моделі:

- 1. Початкове маркування (Етап 1):** Усі 5 болтів мають токени у стані [Закручено], кришка – у стані [Встановлено]. У пулі ресурсів наявні 3 авторизовані користувачі ([Слюсарі]), однак у пулі інвентарю доступні лише 2 токени ([Гайковий ключ]).
- 2. Конкурентний доступ та паралелізм (Етап 2):** Два користувачі ініціюють відкручування перших двох болтів (у будь-якому порядку). Відбувається перевірка охоронних умов ($actor.id == tool.owner$, тобто слюсарі, що виконують дію, мають ключі). Токени цих двох слюсарів та двох ключів тимчасово "всмоктуються" (блокуються) у відповідних переходах на час програвання 3D-анімації. Якщо третій

слюсар спробує відкрутити болт, його дія буде математично заблокована через відсутність токена з його id у пулі інвентарю.

3. **Досягнення передумов синхронізації (Етап 3):** Після завершення анімацій токени повертаються у ресурсні пули, а токени болтів переміщуються у стан [Відкручено]. Коли всі 5 болтів переходять у цей стан, активуються тестові дуги, які підтверджують виконання залежностей для фінальної дії.
4. **Спільна дія (Етап 4):** Перехід [Зняти кришку] є точкою емерджентної синхронізації (Rendezvous). Він вимагає наявності рівно двох токенів з пулу [Слюсарі] (вага дуги = 2). Дія математично заблокована, доки два користувачі не ініціюють її одночасно. Після спрацьовування переходу токен цільового об'єкта переміщується у фінальний стан [Кожух: Знято], успішно завершуючи кооперативний етап.

Г.2. Моделювання послідовної асиметричної взаємодії ролей

На рис. Г.2 наведено приклад взаємодії незалежних ролей: слюсар не може розпочати демонтаж до зняття напруги електриком.

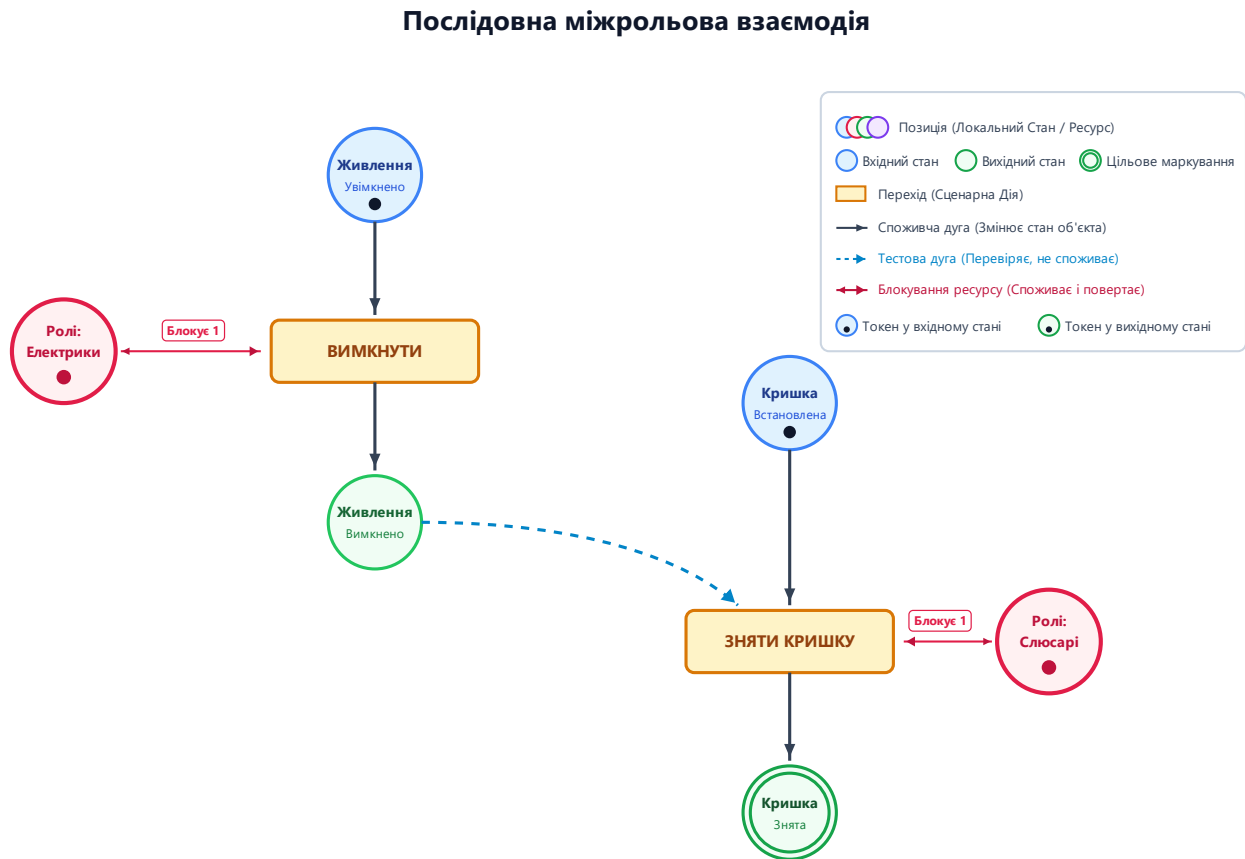


Рис. Г.2. Емерджентна синхронізація асиметричних ролей через стани об'єктів

В архітектурі МРВ ролі не обмінюються повідомленнями напряму. Їхня координація здійснюється виключно через стани 3D-моделей. Дія «Електрика» переміщує токен у стан [Живлення: Вимкнено], що активує тестову дугу для переходу «Зняти кришку» і автоматично розблоковує виконання сценарію для «Слюсаря».

Г.3. Інтерфейс, керований станами (State-Driven UI) для режиму демонстрації

У режимі «Демонстрації» логіка МРВ адаптується для управління 2D-інтерфейсом підказок (рис. Г.3).



Рис. Г.3. Синхронізація логіки 2D-інтерфейсу (UI) та 3D-об'єктів через єдиний перехід мережі Петрі

У даній конфігурації тригером для спрацьовування переходу виступає подія натискання кнопки в інтерфейсі користувача. Зміна маркування графа автоматично змінює стан 3D-моделей (запускаючи анімацію) та генерує нові токени для UI-станів, динамічно підтягуючи нові текстові підказки з метаданих поточного вузла.

Г.4. Управління когнітивним навантаженням: Каскадне автодоповнення дій

Для зниження когнітивного навантаження на базових рівнях підготовки («Новачок») система застосовує метод динамічної трансформації графа (рис. Г.4).

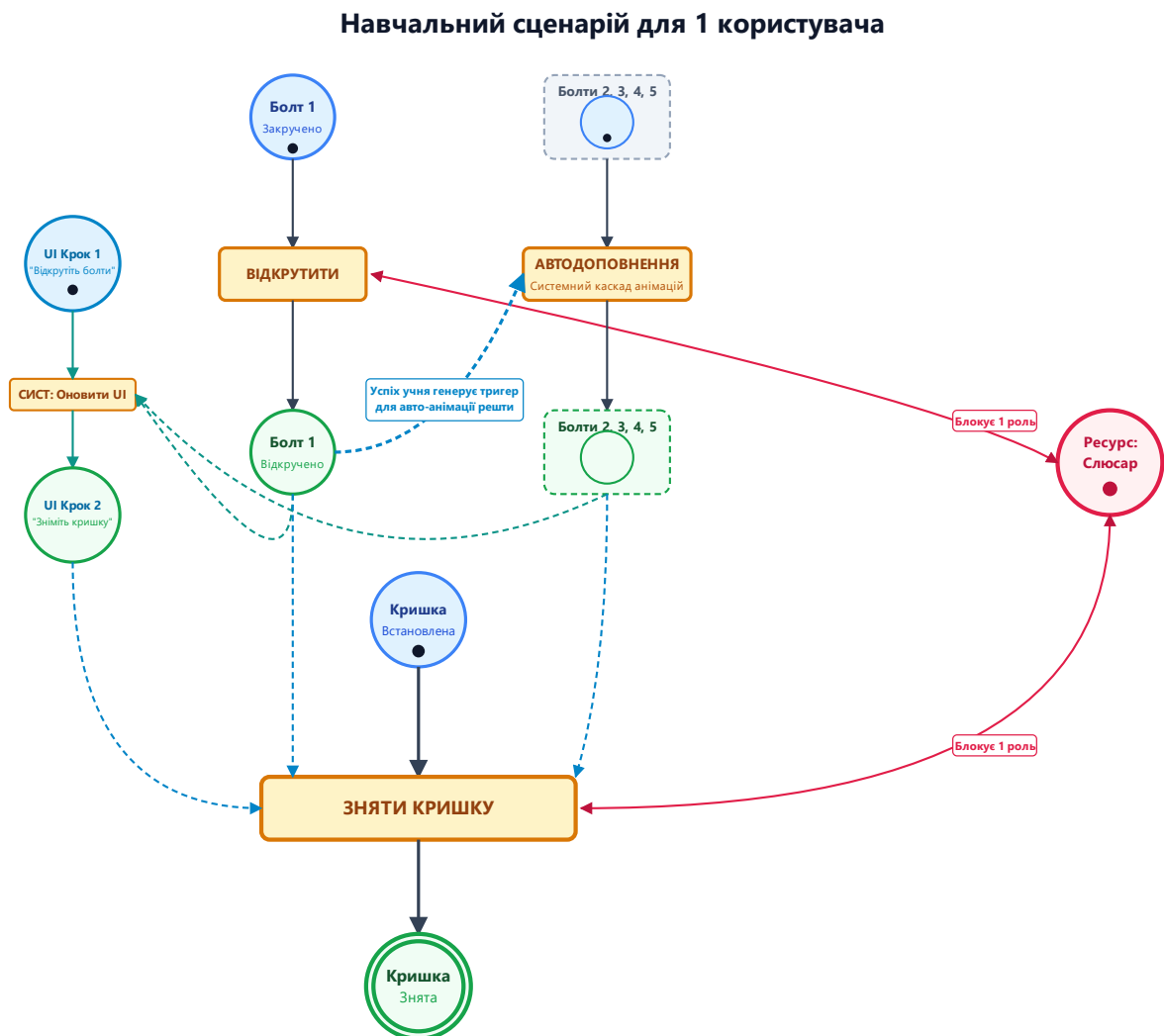


Рис. Г.4. Алгоритм автодоповнення (Action Chunking) рутинних операцій на основі системних тригерів

Якщо атрибут логічної важливості переходу є низьким, ручне виконання користувачем першої дії з масиву (наприклад, відкручування

першого болта) генерує токен у системному пулі тригерів. Це автоматично активує системні переходи для решти об'єктів групи. Алгоритм «забирає» керування у користувача, блокує його ресурси і самостійно ініціює анімації (автодоповнення), звільняючи робочу пам'ять учня від виконання рутинної моторики.