

Карплевський Б.В.

<https://orcid.org/0009-0003-3564-0833>

Glowcraft Installations

ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕГРАЦІЇ ВІРТУАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ У СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕАЛЬНИМ СЦЕНІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ

У статті здійснено системний аналіз сучасних технологій інтеграції віртуальних середовищ у комплексні системи управління реальним сценічним обладнанням, що забезпечує високоточну синхронізацію фізичних і цифрових компонентів театральних, концертних та мультимедійних постановок. Особливу увагу приділено методології взаємодії програмного забезпечення для моделювання сценічних ефектів з апаратними контролерами освітлення, звукового супроводу, механічних конструкцій сцени й систем відеопроєкції, що дозволяє підвищити точність, безпеку та оперативну ефективність керування складними постановочними процесами. Проаналізовано архітектурні підходи до побудови інтегрованих систем, включно з використанням протоколів реального часу (Real-Time Protocols), сенсорних мереж (Sensor Networks), технологій віртуальної й доповненої реальності (VR/AR), а також методів motion capture та систем просторової навігації для оптимізації взаємодії між цифровими моделями й фізичними об'єктами сцени. Розглянуто практичні аспекти попереднього тестування сценічних вирішень у віртуальному середовищі, що забезпечує адаптивність до динамічних змін умов постановки, зменшення ризиків технічних помилок і раціоналізацію ресурсів під час репетиційного процесу. Дослідження підкреслює перспективи розвитку таких інтегрованих систем у напрямі автоматизації керування мультимедійними ефектами, інтерактивної взаємодії з аудиторією, масштабування сценічних вирішень, а також застосування алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування й адаптації сценічних сценаріїв у реальному часі. Вказано на доцільність поетапного проектування інтеграційної архітектури з тестуванням сумісності програмно-апаратних компонентів кіберфізичних сценічних комплексів. У роботі наведено приклади успішної реалізації інтегрованих технологій у сучасних театральних і концертних проєктах, що підтверджують їхню ефективність у підвищенні художньої якості постановки, оптимізації творчих процесів, забезпеченні синергетичної взаємодії між цифровими й фізичними елементами сцени, а також у створенні нового рівня інтерактивного та іммерсивного досвіду для глядацької аудиторії.

Ключові слова: цифрові симуляції, реалістичні моделі, автоматизація процесів, візуалізація сцени, програмне забезпечення контролю, інтерактивні платформи, синхронізація пристроїв, дистанційне управління.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток сценічного мистецтва та індустрії розважальних технологій характеризується динамічною інтеграцією цифрових і віртуальних технологій у традиційні процеси управління сценічним обладнанням, що забезпечує нові можливості для моделювання, планування й контролю технічних систем сцени, включно з освітлювальними комплексами, акустичним оформленням, а також механічними та електронними засобами управління. Застосування VR-симуляторів і цифрових прототипів дозволяє створювати апробовані сценарії роботи обладнання, підвищуючи ефективність та безпеку його експлуатації.

Проте, попри очевидні перспективи, інтеграція віртуальних платформ у реальні системи управління сценічним обладнанням залишається складним інженерно-технологічним завданням. Основні проблемні аспекти пов'язані з технічною несумісністю наявного обладнання із цифровими платформами, використанням пропрієтарних протоколів і застарілих апаратних вирішень. Додаткові труднощі створює гетерогенність стандартів обміну даними на ринку сценічного обладнання, що ускладнює розробку універсальних інтеграційних вирішень. Не менш важливими є й соціально-організаційні виклики, пов'язані з необхідністю трансформації робочих процесів,



перепідготовкою персоналу та адаптацією управлінських практик.

Таким чином, інтеграція віртуальних середовищ у системи управління реальним сценічним обладнанням – багатовимірна проблема, яка поєднує технічні, методичні й організаційні виклики, подолання яких дозволить підвищити ефективність, безпеку та адаптивність сучасних сценічних технологій, а також сприятиме формуванню науково обґрунтованих моделей цифрового управління в умовах стрімкої технологічної трансформації індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі присвячено багато уваги питанням інтеграції імерсивних технологій у традиційні системи управління технічними комплексами. Зокрема, у праці В. Круглик обґрунтовано необхідність упровадження технологій доповненої й віртуальної реальності в освітній простір для підготовки фахівців, здатних працювати в умовах нових технологічних викликів [1, с. 74]. Дослідники Ю. Кулик та А. Батюк у своїх працях аналізують проблематику проєктування та практичної реалізації інтерфейсів взаємодії у VR-середовищі із застосуванням сторонніх програмних вирішень. У дослідженні акцентовано увагу на питаннях інтеграції зовнішніх апаратних модулів, синхронізації віртуальних і фізичних об'єктів, оптимізації каналів передавання даних між програмною платформою й периферійними пристроями [2, с. 81]. Водночас автори розглядають особливості інтеграції хмарних технологій у VR-середовища, зосереджуючи увагу на архітектурних моделях побудови VR-систем, механізмах обробки великих масивів даних і забезпеченні масштабованості цифрових рішень [3, с. 114].

Значний внесок у дослідження впровадження імерсивних технологій у дизайн-практику здійснила В. Бойко, яка обґрунтовує доцільність використання технологій доповненої й альтернативної реальності для підвищення ефективності візуально-комунікативних проєктів в Україні. У її працях акцентовано увагу на трансформації інструментарію дизайн-діяльності під впливом цифрових інновацій та інтерактивних медіа [4].

У дослідженні Т. Хвостової здійснено ґрунтовний аналіз трансформацій сучасної театральної культури в умовах розвитку інтернет-простору й цифрового суспільства. Авторка проаналізувала особливості медіатизації театру, розширення його комунікативних можливостей через онлайн-платформи й формування нових форматів цифрової вистави [5].

Науковці І. Резніченко, О. Негоденко й С. Шевченко оцінюють прикладний потенціал VR-технологій у професійній підготовці, інженерному проєктуванні й створенні тренажерних і навчально-імітаційних систем, підкреслюючи їхнє значення для формування практико-орієнтованих компетентностей фахівців, підвищення безпечності експериментальної діяльності й розроблення цифрових двійників та інтерактивних симуляторів для дистанційного моніторингу й апробації алгоритмів керування складними технічними комплексами [6, с. 45].

Автори Дж. Ортіс (J. Ortiz), Р. Піла (R. Pila), Дж. Юпангі (J. Yupangui) і М. Росалес (M. Rosales) підтвердили ефективність віртуальних середовищ для оптимізації систем автоматизованого управління технологічними процесами [7].

Методологічний потенціал адаптації НІЛ-архітектури до управління світловими, механічними та мультимедійними сценічними комплексами з метою підвищення безпеки й зниження технічних ризиків продемонстрували А. Арісой (A. Arisoy) і Д. Кавала-Сен (D. Kavala Sen) [8].

Отже, аналіз наукових джерел засвідчує, що попри істотні напрацювання у сфері імерсивних практик, інтерактивних мультимедійних технологій, автоматизованих систем керування й цифрового сценічного дизайну, проблема комплексної інтеграції віртуальних середовищ у системи управління реальним сценічним обладнанням залишається фрагментарно дослідженою. Більшість праць зосереджена або на технічних аспектах моделювання 3D-простору та візуалізації, або на інженерних вирішеннях автоматизації світлового, звукового й механічного обладнання, тоді як питання їх синхронізованої взаємодії в реальному часі потребує подальшої теоретико-методологічної розробки.

Недостатньо висвітленими залишаються й механізми інтероперабельності програмно-апаратних комплексів, стандарти протоколів передавання даних, алгоритми латентно-стійкої комунікації між віртуальними об'єктами та фізичними виконавчими пристроями (світловими приладами, медіасерверами, сценічною механікою), а також питання кібербезпеки й відмовостійкості таких систем. У науковому дискурсі відчувається нестача узагальнених моделей, що описують інтеграцію VR-/AR-платформ із системами DMX-, Art-Net- чи OSC-керування в контексті сценографічної практики.

Постановка завдання. Мета статті – теоретичне обґрунтування та практичний аналіз сучас-

них технологій інтеграції віртуальних середовищ у системи управління реальним сценічним обладнанням, а також визначення принципів їхньої функційної сумісності, технічної синхронізації й художньо-технологічної взаємодії.

Виклад основного матеріалу. Інтегрування віртуальних середовищ у системи керування реальним сценічним обладнанням постає однією з ключових тенденцій розвитку сучасного сценічного дизайну й театральнотехнологічної практики, яка поєднує інструменти цифрового моделювання, алгоритмічні механізми управління та принципи кіберфізичних систем, що уможливує гнучке, ефективно й безпечно управління складними сценічними процесами.

У структурі інтегрованих сценічних систем важливу роль відіграє комплекс взаємопов'язаних технологічних компонентів, що забезпечують ефективну функційну взаємодію між віртуальними середовищами й реальним сценічним обладнанням у межах єдиного художнотехнологічного простору. Така інтеграція передбачає не лише технічне поєднання різнорідних систем, але й формування цілісної інфраструктури управління сценічним процесом, яка базується на принципах інтероперабельності, синхронізації даних та алгоритмічної координації.

Ключовими елементами цієї інфраструктури виступають програмні платформи тривимірного моделювання й візуалізації, системи керування медіаконтентом, комунікаційні інтерфейси передавання даних, а також спеціалізовані програмно-апаратні модулі, що забезпечують інтеграцію різних протоколів керування сценічними пристроями. До них належать системи світлового контролю, цифрові аудіопроектори, відеосервери, механізми автоматизованого керування сценічною механікою й сенсорні системи відстеження руху. Взаємодія цих компонентів реалізується через стандартизовані протоколи обміну даними, що забезпечують стабільність, масштабованість

і гнучкість функціонування інтегрованої сценічної екосистеми (табл. 1).

Таким чином, інтегровані сценічні системи – комплексна інфраструктура, де взаємодіють віртуальні середовища й реальне сценічне обладнання в межах єдиного художнотехнологічного простору. Їхня ефективність забезпечується поєднанням програмних платформ для 3D-моделювання та візуалізації, систем проміжного зв'язку й синхронізації, а також алгоритмічних та аналітичних модулів управління. Основна мета такої інтеграції – створення цілісної системи управління сценічним процесом, що базується на принципах інтероперабельності, синхронізації даних та алгоритмічної координації.

На сьогодні можна виокремити два фундаментально різні підходи до інтеграції віртуальних середовищ у системи управління сценічним обладнанням. Перший підхід передбачає повну симуляцію віртуального середовища до фактичного використання фізичного обладнання. Ця методологія забезпечує комплексну оптимізацію сценографічних вирішень, дозволяє здійснювати віртуальне тестування світлових, звукових і спецефектів, а також моделювати кінематику механічних систем без необхідності залучення реальних ресурсів. Завдяки цьому підходу можлива не лише економія матеріальних і часових витрат, а й підвищення безпеки експериментальних сценаріїв, що критично важливо на етапі підготовки складних сценічних конструкцій.

Другий підхід реалізується через управління в режимі реального часу за схемою гібридного контролю, який поєднує віртуальні моделі з фізичними пристроями. Така інтеграція забезпечує синхронну взаємодію цифрового й матеріального середовищ, формує умови для інтерактивності та дає можливість проведення динамічних експериментів під час репетицій і вистав [9]. Використання цього підходу надає митцям інструментарій для оперативної адаптації постановки до неперед-

Таблиця 1

Компоненти віртуальних середовищ системи управління сценічним обладнанням

Компонент	Опис	Основні технології/інструменти
Програмні платформи управління віртуальним середовищем	Програмно-апаратні комплекси для створення, моделювання й візуалізації віртуальної сцени, 3D-декорацій, світлових і звукових ефектів.	Unity, Unreal Engine, 3D-моделювання, фотореалістична рендеризація
Системи проміжного зв'язку й синхронізації	Технологічні інтерфейси для передавання команд між віртуальним середовищем і фізичними пристроями, забезпечення синхронного управління.	MIDI, OSC, Ethernet, DMX512
Алгоритмічні й аналітичні модулі управління	Системи адаптивного контролю та прогнозування, автоматична корекція сценаріїв постановки, оптимізація рухів механічних елементів.	Машинне навчання, нейромережі, аналітика, оптимізація репетицій

Джерело: створено автором

бачуваних змін, експериментальної модифікації сценографії й корекції режисерських вирішень у режимі реального часу. Поєднання цих двох стратегій інтеграції сприяє створенню високодинамічного й адаптивного сценічного середовища, яке відповідає сучасним вимогам художньо-технологічної інноваційності та дозволяє максимально ефективно використовувати потенціал віртуальних систем у театральному й концертному виробництві (рис. 1).

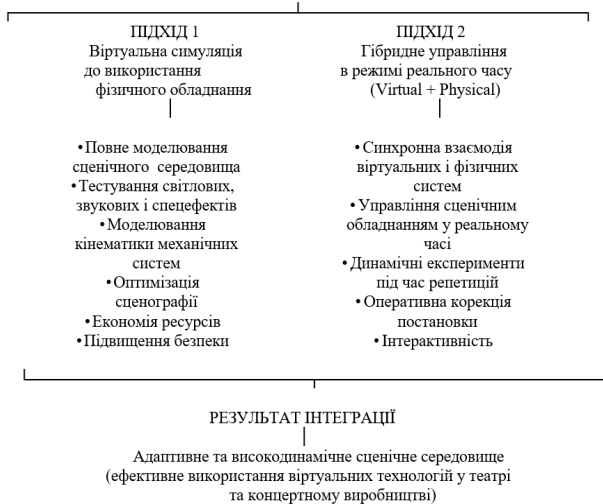


Рис. 1. Підходи до інтеграції віртуальних середовищ у системи управління сценічним обладнанням

Джерело: створено автором

Теоретико-методологічне підґрунтя функційної сумісності та технічної синхронізації між віртуальними й фізичними сценічними елементами – положення системної інженерії, теорії кіберфізичних систем, цифрової сценографії, мережево-орієнтованих архітектур та автоматизованих систем управління реального часу. У парадигмі інтеграції віртуальних середовищ у контур керування реальним сценічним обладнанням центральним завданням постає формування уніфікованої кіберфізичної архітектури, у межах якої цифрові візуалізаційні моделі, програмно-логічні модулі, апаратно-програмні контролери й виконавчі пристрої (інтелектуальні світлові прилади, електромеханічні підйомні механізми, медіасервери, відеопроєкційні комплекси, роботизовані маніпулятори) функціонують як інтегрована розподілена система з високим рівнем когерентності процесів [10, с. 4].

Принцип функційної сумісності означає забезпечення структурної, синтаксичної, семантичної й операційної взаємодії компонентів системи. На

концептуальному рівні це передбачає узгодження протоколів обміну даними, уніфікацію форматів цифрових моделей (зокрема, 3D-геометрії, світлових налаштувань, параметрів анімації), стандартизацію керувальних інтерфейсів і нормалізацію часових характеристик сигналів. Інтєрооперабельність досягається через упровадження прикладних програмних інтерфейсів, використання мережевих протоколів передавання даних і застосування абстрактних моделей даних, що забезпечують коректну трансляцію команд управління між різнорідними підсистемами. У цьому сенсі функційна сумісність розглядається як здатність системи зберігати цілісність функційної логіки під час інтеграції нових апаратних і програмних модулів без зниження продуктивності чи втрати детермінованості.

Архітектурною основою інтегрованої системи виступає принцип модульності й ієрархічної декомпозиції, відповідно до якого сценічний комплекс структуровано за багаторівневою моделлю: рівень моделювання (віртуальна 3D-сцена, цифрові декорації, симуляція світлових сценаріїв), рівень планування (таймлайни, сценарні алгоритми), рівень диспетчеризації (централізований або розподілений контролер), рівень виконання (виконавчі механізми та сенсорні підсистеми). Така організація корелює з теорією багаторівневих автоматизованих систем управління та принципами проектування. Синхронізація між рівнями забезпечується механізмами буферизації, маркуванням часових міток, алгоритмами компенсації латентності й використанням подієво-орієнтованої обробки сигналів [11].

Принцип технічної синхронізації передбачає досягнення часової когерентності й фазової узгодженості всіх елементів сценічного комплексу. У високодинамічному театральному-концертному середовищі критичним є забезпечення мінімальної джитерності й передбачуваного часу відгуку системи. Для цього застосовуються протоколи мережевої синхронізації часу, системи єдиного тактового генератора, а також детерміновані мережеві технології з гарантованою пропускнуою здатністю. Детермінованість процесів визначається як здатність системи забезпечувати прогнозовану реакцію на входні події з фіксованими часовими інтервалами, що досягається через оптимізацію алгоритмів обробки, пріоритезацію трафіку, мінімізацію затримок і резервування критичних каналів зв'язку.

Надзвичайно важливим є впровадження моделі цифрового двійника, який створює мак-

симально точне й адекватне відображення фізичного сценічного обладнання у віртуальному середовищі, акумулюючи водночас усі ключові параметричні характеристики пристрою – від кінематичних обмежень і світлотехнічних показників до електричних навантажень та просторових координат. Ця модель дозволяє не лише проводити верифікацію різних сценаріїв і симулювати поведінку системи в реальному часі, але й прогнозувати можливі граничні режими її функціонування. У межах цієї концепції забезпечення функційної сумісності досягається через узгодження на трьох взаємопов'язаних рівнях: на сигнальному рівні – завдяки відповідності й сумісності протоколів передавання даних; на семантичному рівні – через єдність тлумачення та розуміння параметрів системи; а на логіко-алгоритмічному рівні – шляхом кореляції сценарних подій із конкретними фізичними діями виконавчих механізмів [12, с. 69], що забезпечує точну, узгоджену й синхронізовану взаємодію всіх компонентів системи.

Отже, функційна сумісність та технічна синхронізація під час інтеграції віртуальних середовищ і реального сценічного обладнання досягається через поєднання системного, кіберфізичного, інформаційно-комунікаційного й синергетичного підходів. Їх імплементація забезпечує високий рівень інтегрованості цифрових і матеріальних компонентів сценічного простору, підвищує надійність, масштабованість та відмовостійкість системи, мінімізує ризики часових та логічних колізій і створює методологічні передумови для розвитку інтелектуалізованих сценічних комплексів нового покоління з ознаками автономності й предиктивного управління.

У контексті інтенсифікації процесів цифрової трансформації сценічного мистецтва особливої актуальності набуває дослідження художньо-технологічних параметрів інтероперабельності між віртуальними середовищами й фізичною інфраструктурою сценічного комплексу. Ідеться про формування кіберфізичної сценічної системи, у межах якої програмні рушії тривимірної візуалізації, рендерингу в реальному часі й процедурної анімації інтегруються з апаратно-програмними комплексами керування світлотехнічним, звуковим і механічним обладнанням сцени [13, р. 7]. Така конвергенція зумовлює становлення нової парадигми цифрової сценографії, що функціонує як синхронізована цифрово-фізична екосистема з високим рівнем автоматизації, мережевої взаємодії й алгоритмічної координації.

Ключове технічне завдання цього процесу – забезпечення інтеграційної сумісності й функційної взаємодії між системами генерації віртуального контенту та протокольно орієнтованими системами керування сценічним обладнанням, де критично важливу роль відіграють механізми трансляції даних, конверсії параметрів і проміжні програмні інтерфейси. Саме вони гарантують коректну інтерпретацію віртуальних характеристик інтенсивності освітлення, колірної температури, позиціонування рухомих елементів, панорамування та просторового розташування звукового сигналу у фізичні сигнали управління.

Досягнення функційної взаємодії в системах реального середовища відбувається через інтеграцію протоколів синхронізації й механізмів координації на рівні мережевої інфраструктури, що особливо критично для середовищ із передбачуваною латентністю. Використання високошвидкісних мережевих архітектур у поєднанні з технологіями сегментації трафіку й пріоритетизації потоків дозволяє знизити дисперсію часу передавання сигналу та забезпечити детерміновану роботу компонентів у режимі реального часу [14]. У комплексі це формує уніфікований часовий континуум, у межах якого відбувається координація й синхронізація функцій світлових консолей, медіасерверів, аудіопроекторів і кінетичних модулів.

Художньо-естетичний вимір інтеграції виявляється через концептуалізацію гібридної сценографії, що інтегрує віртуальні декорації, процедурно згенеровані світлові ефекти, об'ємне освітлення й фізичні сценічні об'єкти в цілісну аудіовізуальну композицію. Попереднє цифрове моделювання сцени й створення її віртуальних копій дозволяє системно планувати світлові партитури, траєкторії руху механізмів, акустичні поля та просторові звукові панорами вже на етапі проєктування постановки. Такий підхід сприяє раціоналізації ресурсів, мінімізації технічних ризиків і підвищенню точності реалізації режисерського концепту.

З технологічного погляду інтеграція передбачає застосування систем просторового відстеження та технологій розширеної й доповненої реальності, що забезпечують когерентність координатної системи сцени й віртуального середовища. Використання технологій захоплення руху, тривимірного сканування, інерційних сенсорів, оптичних маркерів і систем позиціонування із шістьма ступенями свободи дозволяє конструювати адаптивні сценарії з реальним зворотним зв'язком [15]. У таких інтегрованих

системах світлові, відео- й аудіоефекти функціонують на принципах інтерактивності та параметричної варіативності, оперативно реагуючи на рухи виконавців, динаміку сценічної мізансцени й трансформації просторової топології.

Особливої уваги потребує проблема композиційної й семіотичної цілісності сценічного образу. Технологічну інфраструктуру має бути інкорпоровано в драматургічну структуру вистави на засадах функційної доцільності й концептуальної релевантності. Надмірна візуальна насиченість, алгоритмічна гіпердинаміка або технологічний детермінізм можуть спричинити деконструкцію сценічного знака й порушення когерентності художнього наративу. Відтак інтеграція цифрових середовищ потребує міждисциплінарної координації між сценографом, медіахудожником, технічним режисером, інженером світла й системним інтегратором.

Отже, художньо-технологічний аналіз взаємодії віртуальних середовищ і реального сценічного обладнання передбачає дослідження архітектури програмно-апаратних комплексів, протоколів передавання й синхронізації даних, алгоритмів обробки сигналів, систем просторового трекінгу та принципів цифрової сценографічної композиції. У результаті такої конвергентної інтеграції можна створити інтерактивний, адаптивний і кіберфізично узгоджений сценічний простір, що відповідає вимогам високотехнологічного мистецького виробництва й логіці розвитку цифрової перформативної культури.

У контексті розвитку цифрових сценічних практик і становлення кіберфізичних сценічних екосистем особливої актуальності набуває розроблення практичних рекомендацій щодо імплементації інтегрованих апаратно-програмних комплексів у театральному й концертному виробництві. Технології інтеграції віртуальних середовищ у системи керування реальним сценічним обладнанням потребують системного, мультидисциплінарного підходу, що охоплює архітектурно-інженерні, мережево-комунікаційні, алгоритмічні, організаційно-логістичні й художньо-режисерські аспекти проектування сценічного продукту [16, р. 3].

Насамперед необхідно забезпечити функційну й технічну сумісність програмно-апаратних модулів із можливістю їх інтеграції в єдину цифрову інфраструктуру. На підготовчому етапі виробництва доцільно здійснити комплексну технічну експертизу сценічного обладнання – включно зі світловими консолями, медіасерверами, системами

механізації сцени, аудіопроекторами й контролерами рухомих елементів – з подальшим аналізом їхньої сумісності та потенціалу інтеграції з тривимірною графікою в режимі реального часу. Ключовий аспект цього процесу – забезпечення підтримки стандартизованих протоколів передавання даних, що дозволяють координувати параметри віртуальних об'єктів із фізичними пристроями в реальному часі [17]. Водночас необхідно приділяти особливу увагу мінімізації затримок сигналу, оптимізації пропускну здатності мережевих каналів і стабілізації топології мережі шляхом її сегментації та пріоритезації трафіку.

Також важливо дотримуватися методології попередньої візуалізації, що передбачає створення параметричної тривимірної моделі сцени з інтегрованими світловими, відео- й механічними симуляціями, які працюють на основі фізично коректного рендерингу та систем частинок. Такий підхід дозволяє здійснювати тестування світлових сцен, відеомепінгу й кінетичних сценаріїв ще до фактичного монтажу обладнання на майданчику. Використання інтегрованих медіасерверів, які підтримують обчислення графіки на відеокартах, керування часовою шкалою, роботу з LED-панелями й інтерактивними інтерфейсами, дозволяє зменшити технічні ризики, оптимізувати графік підготовки та підвищити точність реалізації режисерської концепції.

Для масштабних концертних проєктів доцільно також застосовувати модель керування з головним сервером таймкоду, який координує світлові, аудіо- й відеомодулі. Інтеграція систем автоматизованого керування дозволяє реалізувати детерміновану послідовність тригерів, синхронізовану з музичним матеріалом і хореографією. Важливо також забезпечити резервування мережевих вузлів, дублювання медіасерверів і функціонування системи моніторингу, що підвищить надійність роботи інтегрованого комплексу під час живого виконання.

Рекомендовано застосовувати адаптивні моделі управління постановочним процесом, зокрема ітеративне прототипування та спринт-репетиції, а також поєднувати технічні сесії з онлайн-симуляцією у віртуальному середовищі й офлайн-тестуванням, що забезпечує узгодження алгоритмів взаємодії цифрових і фізичних підсистем у реальному часі.

Ефективна реалізація технічних завдань вимагає уваги до кадрово-компетентісної структури проєктів інтегрованих сценічних систем, що передбачає формування міждисциплінарної

команди із чітко диференційованими функційними ролями, до складу якої входять режисер-постановник, сценограф, дизайнер освітлення, медіадизайнер, інженер інтерактивних систем, програміст, системний інтегратор і технічний директор.

Особливу увагу варто приділити проблематиці художньо-технологічної конвергенції та принципам імерсивного дизайну. Віртуальні середовища в цьому контексті виступають не лише декоративними елементами, а є семантично насиченими компонентами драматургічної структури сценічного твору. Використання систем трекінгу руху, сенсорних інтерфейсів, технологій доповненої та змішаної реальності, а також алгоритмів процедурної генерації контенту в режимі реального часу формує інтегровану інтерактивну сценічну екосистему, що забезпечує високий рівень занурення, посилює сприйняття аудиторією й розширює когнітивно-емоційний спектр художнього досвіду.

Важливо також забезпечити масштабованість, модульність та економічну ефективність інтегрованих систем. Модульна архітектура дозволяє адаптувати систему до різних сценічних просторів і бюджетних обмежень без втрати функційної цілісності. Водночас використання хмарних сервісів для зберігання, версіювання та синхронізації медіаконтенту дозволить оптимізувати логістику виробництва й підвищити мобільність гастрольних проєктів. Крім того, доцільним є впровадження енергоефективних технологій, зокрема світлодіодного освітлення й оптимізації енергоспоживання, що відповідає принципам сталого розвитку та екологічної безпеки [18, с. 129].

Таким чином, ефективна інтеграція віртуальних середовищ у системи керування реальним сценічним обладнанням базується на принципах інтероперабельності, цифрового прототипування, низьколатентної синхронізації, кіберфізичної конвергенції й художньої релевантності. Комплексна реалізація зазначених підходів забезпечує формування інноваційної сценічної платформи, у межах якої віртуальні й матеріальні компоненти функціонують як єдина інтегрована кіберфізична система управління сценічним простором.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що інтеграція віртуальних середовищ у системи управління реальним сценічним обладнанням – комплексний міждисциплінарний процес, який поєднує інформаційно-комунікаційні технології, інженерію сценічних систем і художньо-

постановочні практики. Доведено, що ефективність такої інтеграції залежить від забезпечення функційної сумісності програмних платформ тривимірної візуалізації, систем реального часу та апаратно-програмних комплексів керування світловими, звуковими, механічними й мультимедійними пристроями.

Теоретично обґрунтовано принципи функційної сумісності та технічної синхронізації між віртуальними й фізичними сценічними елементами, зокрема принципи інтероперабельності, протокольної стандартизації, часової кореляції сигналів, латентної оптимізації та адаптивної масштабованості системи. Установлено, що ключові умови стабільної роботи інтегрованих комплексів – використання уніфікованих протоколів передавання даних, синхронізація в режимі реального часу й упровадження алгоритмів зворотного зв'язку для корекції параметрів фізичного обладнання відповідно до змін у віртуальному середовищі.

Систематизація художньо-технологічних аспектів управління сценічним обладнанням свідчить про трансформацію традиційної сценографічної парадигми, розширення виражальних можливостей режисури, світлодизайну й мультимедійної композиції в цифровому віртуальному просторі. Інтегровані системи забезпечують новий рівень імерсивності, просторово-часової динаміки та інтерактивності сценічної дії, сприяючи формуванню синтетичного художнього простору, у якому віртуальні й фізичні компоненти асоційовані в єдиній кіберфізичній системі.

На основі узагальнення здобутих результатів розроблено практичні рекомендації щодо впровадження інтегрованих систем у театральних і концертних постановках. Зокрема, указано на доцільність поетапного проєктування інтеграційної архітектури, проведення попереднього моделювання у віртуальному середовищі, тестування сумісності програмно-апаратних компонентів, оптимізації мережевої інфраструктури й підготовки технічного персоналу до роботи з кіберфізичними сценічними комплексами.

Таким чином, технології інтеграції віртуальних середовищ у системи управління реальним сценічним обладнанням формують перспективний напрям розвитку сучасних сценічних мистецтв, забезпечуючи синергію цифрових інновацій та традиційних технічних засобів і відкриваючи нові можливості для художньо-технологічного експерименту.

Список літератури:

1. Круглик В. Інтеграція технологій доповненої та віртуальної реальності з адаптивними системами навчання: аналіз концептуальних моделей. *Освітологічний дискурс*. 2023. № 4(43). С. 69–82. DOI: <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2023.44>.
2. Кулик Ю., Батюк А. Аналіз, розроблення та практичне застосування інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2025. Т. 35, № 6. С. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.36930/40350609>.
3. Батюк А. Є., Кулик Ю. Р. Інтеграція хмарних технологій у віртуальну реальність. Український журнал інформаційних технологій. 2024. Т. 6, № 1. С. 109–119. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.23939/ujit2024.01.109>.
4. Бойко В. А. Імерсивні технології проектування у візуально-комунікативному контексті дизайну в Україні: дис... доктора філософії 02.022.01. Київ, 2025. 257 с. URL: https://knukim.edu.ua/wp-content/uploads/2025/08/Войко-В.-Dysertacziya_01.08.2025-pdf.io_compressed.pdf (дата звернення: 27.02.2026).
5. Хвостова Т. В. Сучасний театр в умовах розвитку інтернет простору: дис... доктора філософії 03.034.01. Київ, 2025. 189 с. URL: https://knukim.edu.ua/wp-content/uploads/2025/08/DYSERTACZIYA-HVOSTOVA_compressed.pdf (дата звернення: 27.02.2026).
6. Резніченко І., Негоденко О., Шевченко С. Дослідження програмних та технічних засобів для реалізації технології віртуальної реальності. *Наука, експлуатація, виробництво*. 2024. № 1. С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.014147>.
7. Ortiz J., Pila R., Yupangui J., Rosales M. Interactive Teaching in Virtual Environments: Integrating Hardware in the Loop in a Brewing Process. *Submission received*. 2024. Vol. 14, № 5. 2170. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14052170>.
8. Arisoy A., Kavala Sen D. A hardware-in-the-loop simulation case study of high-order sliding mode control for a flexible-link robotic arm. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 19. 10484. DOI: <https://doi.org/10.3390/app151910484>.
9. Gagnere G., Plessiet C., Sohier R. Interconnected virtual space and theater: a research–creation project on theatrical performance space in the network era. *Challenges of the Internet of Things: Technology, Use, Ethics*. 2024. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119549765.ch8>.
10. Бойко О., Кабацька О., Усик Л. Інтеграція технологій віртуальної та доповненої реальності у процес навчання іноземних мов: потенціал VR та AR для формування комунікативної компетентності здобувачів освіти. *Академічні візії*. 2025. № 47. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17186975>.
11. Велущак М. Я., Гарачковський О. І., Василенко О. В. Використання доповненої реальності в освітньому процесі закладів вищої освіти України. *Академічні візії*. 2025. № 42. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15192765>.
12. Тормахова А., Алексієнко О. Цифрова трансформація сучасних українських виставково-експозиційних практик. *Українські культурологічні студії*. 2025. Т. 1, № 16. С. 67–73. DOI: [https://doi.org/10.17721/UCS.2025.1\(16\).10](https://doi.org/10.17721/UCS.2025.1(16).10).
13. Kim Y., Lu J., Höllerer T. Dynamic theater: location-based immersive dance theater, investigating user guidance and experience. *Proceedings of the 2023 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'23)*. 2023. Art. 27. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.00961>.
14. Erdmann M., Berg M., Steffens J. Development and evaluation of a mixed reality music visualization for a live performance based on music information retrieval. *Frontiers in Virtual Reality*. 2025. № 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1552321>.
15. Feng W., Xu L., Li W. Research on the integration of stage performance and virtual technologies in the digital media art environment. *Distributed, ambient and pervasive interactions. Lecture notes on computer science*/Eds. N. A. Streitz, S. Konomi. HCII. 2023. Springer, Cham. Vol. 14037. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-34609-5_16.
16. Zhao S., Abou-zeid H., Atawia R., Manjunath Y. S. K., Sediq A. B., Zhang X.-P. Virtual reality gaming on the cloud: A reality check. *Communications Conference (GLOBECOM)*. 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685808>.
17. Source Dedicated Server. *Valve Developer Community*: вебсайт. 2023. URL: https://developer.valvesoftware.com/wiki/Source_Dedicated_Server (дата звернення: 27.02.2026).
18. Русаков С. Вплив імерсивних технологій на сприйняття мистецтва в контексті трансформації сучасного артринку: культурологічні аспекти дослідження. *Питання культурології*. 2023. № 41. С. 121–133. DOI: <https://doi.org/10.31866/2410-1311.41.2023.276701>.

Karplevskiy B.V. TECHNOLOGIES FOR INTEGRATING VIRTUAL ENVIRONMENTS INTO REAL STAGE EQUIPMENT CONTROL SYSTEMS

The article presents a systematic analysis of modern technologies for integrating virtual environments into complex control systems for real-stage equipment, thereby ensuring high-precision synchronization of the physical and digital components of theatrical, concert, and multimedia productions. Particular attention is paid to the methodology for the interaction between software for modeling stage effects and hardware controllers for lighting, sound, mechanical stage structures, and video projection systems, which increases the accuracy, safety, and operational efficiency of controlling complex production processes. Architectural approaches to building integrated systems are analyzed, including the use of real-time protocols (Real-Time Protocols), sensor networks (Sensor Networks), virtual and augmented reality technologies (VR/AR), as well as motion capture methods and spatial navigation systems to optimize the interaction between digital models and physical objects of the stage. The practical aspects of pre-testing stage solutions in a virtual environment are considered, ensuring adaptability to dynamic changes in production conditions, reducing the risk of technical errors, and rationalizing resources during the rehearsal process. The study highlights the prospects for developing such integrated systems to automate multimedia effects control, enhance audience interaction, scale stage solutions, and use artificial intelligence algorithms to predict and adapt stage scenarios in real time. The expediency of a step-by-step integration architecture design, with compatibility testing of software and hardware components of cyber-physical stage complexes, is indicated. The paper provides examples of successful implementation of integrated technologies in modern theater and concert projects, which confirm their effectiveness in increasing the artistic quality of the production, optimizing creative processes, ensuring synergistic interaction between digital and physical elements of the stage, and creating a new level of interactive and immersive experience for the audience.

Keywords: digital simulations, realistic models, process automation, stage visualization, control software, interactive platforms, device synchronization, remote control.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026