

УДК 069:004.94(045)

## МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ ЕКСПОЗИЦІЙ ДЛЯ ВЕБПЛАТФОРМ ЦИФРОВИХ МУЗЕЇВ

О. А. Бобарчук<sup>1</sup>, О. О. Філіпас<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний університет «Київський авіаційний інститут»  
проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058, Україна  
e-mail: oleksandr.bobarchuk@npp.kai.edu.ua

<sup>2</sup> Державний університет «Київський авіаційний інститут»  
проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058, Україна

У статті розглянута методологія створення веб-платформи для цифрових музеїв з інтегрованою інтерактивною 3D-моделлю. На прикладі магнітофона «Маяк МП140С» описано повний технологічний цикл від збору референсів та декомпозиції об'єкта до фізично коректного текстурування (PBR-текстурування), нелінійних анімацій (NLA) у Blender та фінальної інтеграції у веб-середовище засобами React, Three.js і Web Audio API. Обґрунтовано вибір технологічного комплексу та описані ключові архітектурні рішення: управління станом анімацій через AnimationMixer, реалізацію Raycasting для активної взаємодії з елементами та синхронізацію аналогового індикатора рівня гучності (VU-метра) з аудіосигналом через AnalyserNode. Запропоновано відтворювану методологію, придатну для побудови цифрових музейних експозицій будь-якого масштабу.

**Ключові слова:** цифровий музей, 3D-моделювання, інтерактивність, веб публікування, Three.js, React, GLB, нелінійна анімація, NLA, PBR-текстурування, Web Audio API, SPA.

**Постановка задачі.** Більшість традиційних офлайн-музеїв стикаються із системним протиріччям: найцінніші та найрідкісніші експонати зберігаються у запасниках і недоступні для широкої публіки. За даними ЮНЕСКО [10], лише близько 20 % музейних фондів у світі доступні для відвідувачів у фізичному вигляді. Решта - 80 % - зберігається поза виставковими залами. Пандемія COVID-19 і збройний конфлікт в Україні ще більше загострили цю проблему, обмеживши фізичний доступ до культурних установ і підштовхнувши музейну галузь до прискореної цифровізації.

Музей техніки магнітного запису Науково-дослідного інституту електромеханічних приладів (НДІ ЕМП, м. Київ) зберігає унікальну колекцію магнітофонів і магнітол радянської та пострадянської доби. Значна частина апаратів існує в одиничних екземплярах і недоступна широкій аудиторії. Традиційні засоби цифровізації - фотографії, відеоролики, статичні 3D-переглядачі - не забезпечують необхідного рівня занурення та взаємодії для повноцінного представлення технічних артефактів, у яких важлива не лише зовнішня форма, але й функціональні

характеристики: кнопки та інші органи управління, механізми відкриття, індикатори стану.

Задача дослідження полягає у розробці відтворюваної методології та її технічному втіленні у вигляді веб-платформи, яка б забезпечувала: відображення фотореалістичної 3D-моделі музейного експоната безпосередньо у браузері без встановлення стороннього програмного забезпечення; повноцінну клікабельну інтерактивність - натискання кнопок, відкриття відсіків, обертання регуляторів з анімованим відгуком; синхронізацію анімацій з аудіосигналом у режимі реального часу; адаптивність для десктопних і мобільних пристроїв. Водночас ставиться вимога щодо реалізації методології виключно на основі безкоштовного програмного забезпечення, що є критично важливим для музейних установ з обмеженим бюджетом.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання цифровізації культурної спадщини активно досліджується у міжнародному науковому середовищі. У роботі [1] розглянуто концепцію «цифрового двійника» музейного об'єкта та її реалізацію на базі фотограмметрії й структурованого освітлення. Показано, що фотограмметричні методи дають прийнятну якість для великих об'єктів з добре вираженою текстурою поверхні, однак поступаються ручному моделюванню при відтворенні дрібних деталей і плоских блискучих поверхонь, характерних для побутової електроніки та приладів [11]. Касетний магнітофон з огляду на складну геометрію передньої панелі та значну кількість дрібних функціональних елементів є об'єктом, де фотограмметрія дає неприйнятний результат, що підтверджує доцільність ручного полігонального моделювання.

Огляд платформ для 3D-представлення музейних колекцій [2] демонструє, що найпоширеніші рішення Sketchfab, Google Arts & Culture, Smithsonian 3D Digitization забезпечують перегляд об'єктів, але не підтримують складної програмованої інтерактивності. Користувач може обертати модель і масштабувати її, проте не може «натиснути кнопку» і отримати анімовану реакцію з аудіосупроводом. Питання інтеграції нелінійних анімацій і аудіовізуальної синхронізації у музейному контексті залишається практично нерозробленим.

Інструментальна база для 3D-моделювання об'єктів культурної спадщини охоплює широкий спектр рішень, але їхні можливості суттєво відрізняються залежно від цільового середовища відтворення. Autodesk Maya є індустріальним стандартом у кінематографі та анімації, однак для веб-інтеграції вона має принципові обмеження: підготовка моделі до WebGL потребує сторонніх розширень або складних сценаріїв конвертації [3]. Cinema 4D орієнтований на motion-дизайн і рекламу, його інструментарій менш придатний для точного моделювання твердих поверхонь складних механічних вузлів, а експорт у glTF з коректним збереженням PBR-матеріалів потребує додаткового налаштування. Інженерні CAD-системи (SolidWorks, Fusion 360) хоча й дозволяють точно відтворити механіку, працюють з NURBS-поверхнями, які при конвертації у полігональну сітку для вебу дають неоптимальну топологію та артефакти затінення, критичні для WebGL-рендерингу.

На відміну від зазначених рішень, Blender поєднує інструментарій твердотільного моделювання з нативним GLB-експортом та вбудованими засобами ретопології й запікання текстур [3]. Це дозволяє отримати легку полігональну сітку з коректно збереженими нелінійними анімаціями без проміжних конвертацій. Некомерційна ліцензія GPL є додатковим аргументом у контексті обмежень бюджетних музейних установ.

При виборі технологій веб-рендерингу в літературі розглядаються три основні підходи: ігрові рушії з WebGL-експортом (Unity, Unreal Engine), спеціалізовані WebGL-рушії (Babylon.js) та легковагові WebGL-бібліотеки (Three.js). Дослідження [4] показують, що Unity та Unreal при WebGL-компіляції генерують збірки значного розміру з тривалим часом початкового завантаження - параметр, критичний для публічних веб-сервісів без попереднього встановлення. Крім того, інтеграція 3D-сцени з HTML/CSS-елементами сторінки у цих рушіях суттєво обмежена, що ускладнює реалізацію гібридного інтерфейсу з підказками та елементами керування поза 3D-вікном. Babylon.js пропонує потужнішу, ніж Three.js, систему фізики та вбудовані VR/AR-засоби, однак розмір скомпільованого пакету та складність архітектури не виправдані для застосунку, зосередженого на одному інтерактивному об'єкті [4]. Three.js забезпечує оптимальне співвідношення можливостей і ваги: бібліотека абстрагує найскладніші аспекти WebGL (шейдери, буфери, матричні перетворення), залишаючись достатньо «прозорою» для точного контролю над кожним вузлом сцени, що є вирішальним для реалізації поелементної інтерактивності моделі.

Щодо формату передачі 3D-даних, аналіз специфікацій [9] показує, що glTF 2.0 та його бінарна версія GLB є єдиним форматом, який одночасно підтримує PBR-матеріали, ієрархію вузлів та NLA-анімації у структурі, безпосередньо відповідній внутрішньому представленню даних WebGL у GPU. Формат OBJ не підтримує анімацію та має текстовий формат із надлишковим обсягом. FBX, незважаючи на підтримку анімацій, є пропрієтарним, вимагає значних обчислювальних ресурсів для розбору та генерує великі файли, що негативно впливає на час завантаження веб-сторінки. Аналіз специфікації GLB підтвердив, що функції NLA-Action у Blender при коректному налаштуванні повністю зберігають свою структуру при експорті й стають доступними через AnimationClip у Three.js без додаткової конвертації.

Технічні аспекти Web Audio API для аналізу аудіо сигналу в реальному часі представлені у специфікації W3C [7] та практичних дослідженнях [8]. AnalyserNode як інструмент частотного аналізу є добре задокументованою технологією. React Three Fiber як декларативна обгортка Three.js розглядається у документації проєкту [5] і дослідженнях [6], що підтверджують суттєве скорочення обсягу службового коду при збереженні повного доступу до Three.js API. Разом з тим поєднання Web Audio API з AnimationMixer для «прямої» передачі амплітудних значень аудіо сигналу як параметрів повороту 3D-об'єктів у реальному часі в контексті музейних застосунків у літературі не описано.

Таким чином, попри наявність окремих досліджень з кожної технічної складової, комплексна відтворювана методологія, що поєднує полігональне PBR-

моделювання у Blender, нелінійні анімації (NLA), GLB-експорт, React Three Fiber та аудіовізуальну синхронізацію в єдиний технологічний ланцюжок для потреб музейної цифровізації, у науковій літературі відсутня.

**Метою дослідження** є розробка та апробація методології створення інтерактивної веб-платформи для цифрового музею техніки магнітного запису, що охоплює повний технологічний цикл від фіксації реального об'єкта до публікації функціонального веб-застосунку, а також обґрунтування технічних рішень, покладених в її основу.

**Наукова новизна** роботи полягає у розробці комплексної відтворюваної методології створення інтерактивних веб-платформ для цифрових музеїв, яка вперше системно поєднує: (1) полігональне PBR-моделювання технічних артефактів у Blender із використанням нелінійних анімацій (NLA) як самостійних програмно-адресованих модулів; (2) декларативну архітектуру веб-застосунку на основі React Three Fiber, де стан 3D-сцени є похідним від стану React-компонента, а не навпаки; (3) метод прямої аудіовізуальної синхронізації, при якому миттєві амплітудні значення спектрального аналізатора Web Audio API використовуються як параметри кутового положення тривимірних об'єктів у реальному часі.

Практична цінність запропонованої методології підтверджена апробацією на прикладі створення віртуальної інтерактивної моделі магнітофона «Маяк МП140С» з публікацією у веб середовищі. Отримана платформа забезпечує стабільну частоту оновлення зображення 60 кадрів/с, крос-браузерну сумісність та затримку аудіовізуальної реакції в межах 16-33 мс при використанні виключно безкоштовного програмного забезпечення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Запропонована методологія складається з чотирьох послідовних етапів: підготовка, моделювання, інтеграція та тестування (рис. 1). Кожен етап має чітко визначені входи (результати попереднього етапу або зовнішні дані), виходи та критерії якості, що забезпечує відтворюваність процесу.

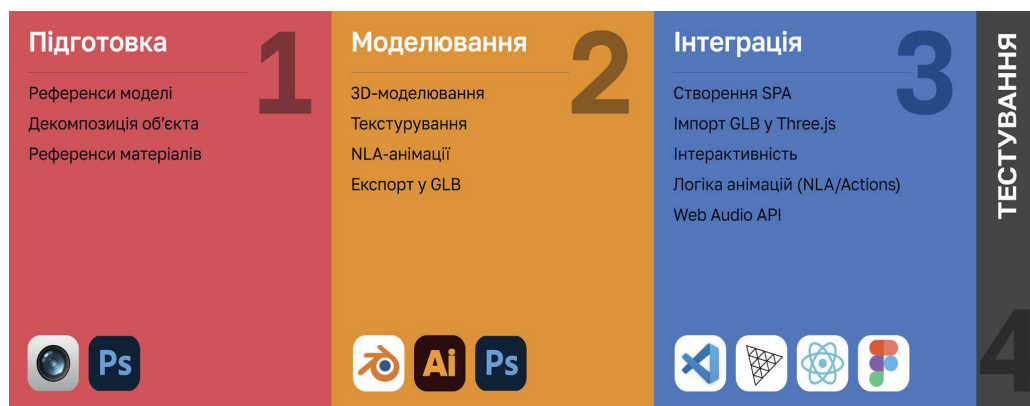


Рис. 1. Етапи створення інтерактивних 3D-моделей у вебi

Об'єктом дослідження обрано касетний стереомагнітофон «Маяк МП140С» - типовий представник вітчизняної побутової техніки 1990-х років, наявний у колекції НДІ ЕМП. Апарат характеризується складною передньою панеллю (близько 20 функціональних кнопок, аналоговий індикатор рівня гучності (VU-метр), лічильник магнітної стрічки, цифрова індикація) та добре вираженою тривимірною структурою, що робить його оптимальним тестовим об'єктом для відпрацювання методології (рис. 2).

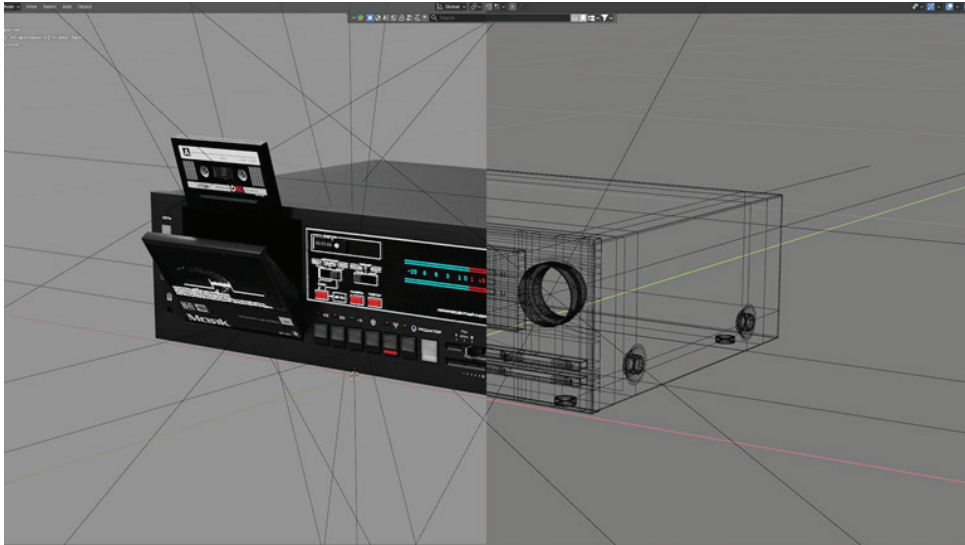


Рис. 2. Модель «Маяк МП140С», PBR-текстури ліворуч, низькополігональна модель праворуч

### Етап 1. Підготовка

Підготовчий етап включає три складові: збір візуальних матеріалів, декомпозицію об'єкта та визначення параметрів матеріалів. Оскільки для більшості радянських побутових приладів, таких як «Маяк МП140С», відсутні оригінальні інженерні CAD-моделі, робота базується на детальному фотографуванні реального зразка. Фотографування апарата виконується при рівномірному освітленні з шести проєкцій (фронт, тил, обидва боки, згори, знизу) та макрозйомка передньої панелі, елементів керування, індикаторів та інтерфейсів підключення. На цьому ж етапі здійснюється декомпозиція об'єкта - визначення частин, що мають бути статичними (корпус, панель управління), та тих, що потребують незалежної анімації (кнопки, індикаторна секція (VU-метр, лічильник магнітної стрічки), регулятори, підкасетник, допоміжні елементи). Кожна група є окремим об'єктом у майбутній Blender-сцені - це технічна вимога для прив'язки анімацій. Аналіз матеріалів визначає фізичні властивості поверхонь для PBR-текстурування: металік, шорсткість, відбивання кожного елемента і дозволяє наперед спланувати ієрархію об'єктів у майбутній 3D-сцені.

## Етап 2. Моделювання

На другому етапі в середовищі Blender створюється високополігональна модель методом ручного полігонального моделювання. Вибір цього методу замість фотограмметрії зумовлений необхідністю отримати ідеальну геометрію для технічних поверхонь та уникнути візуальних дефектів на відбиваючих елементах. Корпус моделі будується від примітивів з поступовим додаванням деталей через Loop Cut, Bevel та Extrude. Кожна інтерактивна деталь моделюється як окремий Mesh Object - необхідна умова для коректної роботи AnimationMixer у Three.js. Загальна кількість трикутників фінальної моделі - близько 180 тисяч, що є компромісом між деталізацією та продуктивністю.

Під час текстурювання особлива увага приділяється створенню матеріалів на основі принципу PBR (Physically Based Rendering). Для кожного елемента налаштовуються карти кольору (Albedo), шорсткості (Roughness), металічності (Metallic) та нормалей (Normal Map), що забезпечує реалістичну взаємодію моделі зі світлом. Написи і шкали панелі створюються в Adobe Illustrator і Photoshop.

На етапі заікання текстур всі написи та позначки на панелі магнітофона переносяться на єдину текстурну розгортку, що дозволяє зберегти високу деталізацію при низьких витратах системних ресурсів. Також створюються нелінійні анімації (NLA - Non-Linear Animation), які зберігаються безпосередньо у файлі формату GLB. За рахунок зменшення деталізації для невидимих поверхонь, стиснення текстур до 2048x2048 або 1024x1024 та конвертації файлів у WebP вдається зменшити розмір отриманого фінального GLB-файлу до 4 МБ.

## Етап 3. Інтеграція у веб-середовище

Цей етап є найбільш технологічно складним і включає перенесення статичної моделі в інтерактивний веб-простір.

Архітектура веб-частини проекту побудована на комплексі технологій React + React Three Fiber (R3F) + Drei + Vite. Вибір R3F дозволяє використовувати декларативний підхід: опис сцени здійснюється через JSX-компоненти, що забезпечує природну інтеграцію механізмів управління станом React для роботи з анімаціями та звуком. Вся взаємодія відбувається в рамках односторінкового застосунку (Single Page Application - SPA), що гарантує плавний досвід без перезавантажень сторінки.

Логіка взаємодії та управління станом реалізована через центральний компонент системи, який координує стан плеєра через реактивні змінні (чи увімкнено живлення, чи відкритий касетоприймач, який рівень на регуляторі гучності тощо). Ключовий архітектурний принцип — 3D-сцена є «підлеглою» до стану React: вона лише відображає поточні дані, тоді як бізнес-логіка (наприклад, блокування кнопки «Play» при відкритому касетоприймачі) реалізована на рівні компонентів.

Взаємодія з об'єктами реалізована через механізм Raycasting (прорахунок променя від курсора до об'єкта). Використання бібліотеки Drei дозволяє обробляти кліки безпосередньо на 3D-сітках. Управління рухами (натискання кнопок, обертання підкасетника) здійснюється через AnimationMixer, який забезпечує відповідність логічних назв дій їхнім ідентифікаторам у файлі моделі.

Освітлення сцени та візуальні ефекти реалізовані за трирівневою схемою: HDRI-середовище для дифузного світла та відбиття на метали; DirectionalLight для формування тіней та виявлення об'єму, а також PointLight для пом'якшення контрастів; ефект світіння (Bloom) застосовано виключно до світлодіодів та індикаторів, що додає моделі реалізму працюючого приладу.

Синхронізація VU-метра з аудіосигналом реалізована через Web Audio API, що дозволяє створити ланцюжок обробки сигналу, де вузол аналізатора (AnalyserNode) у реальному часі отримує спектральні дані. Ці значення автоматично нормалізуються і передаються як параметри кута повороту для віртуальних стрілок VU-метра. Це забезпечує синхронну реакцію індикаторів на звук із затримкою 16-33 мс, що не перевищує поріг сприйняття людини 50 мс.

#### **Етап 4. Тестування**

Завершальний етап присвячений перевірці працездатності та технічному вдосконаленню платформи.

Технічне тестування включає перевірку стабільності частоти кадрів (цільовий показник — 60 fps) та швидкості відгуку інтерфейсу. Особлива увага приділяється крос-браузерній сумісності (Chrome, Firefox, Safari) та коректному відображенню на різних типах пристроїв. Тестується логіка обробки подій, зокрема усунення помилок подвійного спрацювання при кліках на складні ієрархічні структури моделі.

Для забезпечення швидкого завантаження проводиться оптимізація активів шляхом стиснення геометрії та текстур. Використання формату GLB у поєднанні з ефективним управлінням ресурсами дозволило досягти компактного розміру файлу (4 МБ). Це критично важливо для веб-експозицій, оскільки дозволяє відвідувачу почати взаємодію з експонатом майже миттєво після відкриття сторінки.

Платформа розгорнута на хмарному сервісі Vercel з автоматичним безперервним розгортанням через інтеграцію з GitHub. Час розгортання приблизно 45 с від моменту публікації змін у репозиторії до оновлення живого сайту. GLB-файл обслуговується з тривалим кешуванням на стороні клієнта. Оновлення моделі реалізовано версіонуванням імені файлу, що автоматично анулює кеш без змін на сервері.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження обґрунтовано та практично апробовано покрокову методологію створення інтерактивних 3D веб-платформ для цифрових музеїв. Основна концепція полягає у трансформації статичного музейного предмета на інтерактивну тривимірну модель, доступну для керування через стандартний інтернет-браузер. Методологія охоплює повний цикл від фіксації реального фізичного об'єкта до публікації функціонального веб-застосунку і включає підготовку (фотографічні референси, декомпозиція на анімаційні модулі, визначення PBR-параметрів матеріалів), полігональне моделювання з PBR-текстуруванням та нелінійними анімаціями у Blender, інтеграцію у веб-середовище засобами React Three Fiber з AnimationMixer і Web Audio API, а також комплексне технічне тестування зручності користування та продуктивності.

На прикладі моделювання магнітофона «Маяк МП140С» доведено практичну застосовність комплексу інструментів Blender + React Three Fiber + Drei + Web

Audio API для реалізації повноцінної інтерактивної цифрової експозиції виключно засобами безкоштовного програмного забезпечення. Важливим результатом роботи є реалізація повної синхронізації аудіосигналу з візуальними елементами моделі. Досягнуто ефекту «цифрової присутності», за якого віртуальні індикатори приладу реагують на звук із точністю, притаманною реальним аналоговим пристроям.

Запропонована методологія є відтворюваною та універсальною. Вона може бути застосована для будь-яких тривимірних об'єктів і адаптована для різних типів мультимедійних веб-проектів. Це створює надійну базу для розвитку сучасних цифрових музеїв, які будуть цікавими та зрозумілими для нового покоління відвідувачів.

Перспективами подальших досліджень є впровадження KTX2-компресії текстур для зменшення розміру GLB у 3-4 рази, інтеграція WebXR API для підтримки AR- та VR-режимів, розроблення напівавтоматичного конвеєра фотограмметрії для об'єктів з менш деталізованими поверхнями, забезпечення доступності (ARIA-атрибути, навігація з клавіатури) відповідно до стандарту WCAG 2.1.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Koutsoudis A., Vidmar B., Ioannakis G., Arnaoutoglou F., Pavlidis G., Chamzas C. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*. 2014. Vol. 15, No. 1. P. 73-79. DOI: 10.1016/j.culher.2012.12.003.
2. Champion E. *Critical Gaming: Interactive History and Virtual Heritage*. Ashgate, 2012. 230 p.
3. Dirksen J. *Learning Three.js: Programming 3D Animations and Visualizations for the Web with HTML5 and WebGL*. Packt Publishing, 2023. 680 p.
4. Lepers B., Quax P., Lamotte W. WebGL performance analysis. *Web3D '11: Proceedings of the 16th International Conference on 3D Web Technology*. 2011. P. 121-129.
5. Pmndrs collective. *React Three Fiber Documentation*. 2024. URL: <https://docs.pmnd.rs/react-three-fiber> (дата звернення: 10.01.2025).
6. Anderson H. *Building Interactive 3D Experiences with React and Three.js*. *Smashing Magazine*. 2023. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2023/03/react-three-fiber> (дата звернення: 10.01.2025).
7. W3C. *Web Audio API*. W3C Recommendation. 2021. URL: <https://www.w3.org/TR/webaudio/> (дата звернення: 10.01.2025).
8. Smus B. *Web Audio API*. O'Reilly Media, 2013. 84 p.
9. Khronos Group. *glTF 2.0 Specification*. 2022. URL: <https://registry.khronos.org/glTF/specs/2.0/glTF-2.0.html> (дата звернення: 10.01.2025).
10. UNESCO. *Museums around the world in the face of COVID-19*. Paris: UNESCO, 2020. 28 p.
11. Bourke P. *Photogrammetry and 3D Scanning for Cultural Heritage*. *Journal of Cultural Heritage*. 2019. Vol. 38. P. 220-231.
12. Pmndrs collective. *Drei Documentation*. 2024. URL: <https://github.com/pmndrs/drei> (дата звернення: 10.01.2025).

## REFERENCES

1. Koutsoudis A., Vidmar B., Ioannakis G., Arnaoutoglou F., Pavlidis G., Chamzas C. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*. 2014. Vol. 15, No. 1. P. 73-79. DOI: 10.1016/j.culher.2012.12.003.
2. Champion E. *Critical Gaming: Interactive History and Virtual Heritage*. Ashgate, 2012. 230 p.
3. Dirksen J. *Learning Three.js: Programming 3D Animations and Visualizations for the Web with HTML5 and WebGL*. Packt Publishing, 2023. 680 p.
4. Lepers B., Quax P., Lamotte W. WebGL performance analysis. *Web3D '11: Proceedings of the 16th International Conference on 3D Web Technology*. 2011. P. 121-129.
5. Pmndrs collective. *React Three Fiber Documentation*. 2024. URL: <https://docs.pmnd.rs/react-three-fiber> (дата звернення: 10.01.2025).
6. Anderson H. *Building Interactive 3D Experiences with React and Three.js*. *Smashing Magazine*. 2023. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2023/03/react-three-fiber> (дата звернення: 10.01.2025).
7. W3C. *Web Audio API. W3C Recommendation*. 2021. URL: <https://www.w3.org/TR/web-audio/> (дата звернення: 10.01.2025).
8. Smus B. *Web Audio API*. O'Reilly Media, 2013. 84 p.
9. Khronos Group. *glTF 2.0 Specification*. 2022. URL: <https://registry.khronos.org/glTF/specs/2.0/glTF-2.0.html> (дата звернення: 10.01.2025).
10. UNESCO. *Museums around the world in the face of COVID-19*. Paris: UNESCO, 2020. 28 p.
11. Bourke P. *Photogrammetry and 3D Scanning for Cultural Heritage*. *Journal of Cultural Heritage*. 2019. Vol. 38. P. 220-231.
12. Pmndrs collective. *Drei Documentation*. 2024. URL: <https://github.com/pmndrs/drei> (дата звернення: 10.01.2025).

doi: 10.32403/1998-6912-2026-1-72-85-94

## METHODOLOGY FOR CREATING INTERACTIVE EXPOSITIONS FOR WEB PLATFORMS OF DIGITAL MUSEUMS

O. A. Bobarchuk<sup>1</sup>, O. O. Filipas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *State University "Kyiv Aviation Institute"*  
*1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, 030158, Ukraine*  
*e-mail: oleksandr.bobarchuk@npp.kai.edu.ua*

<sup>2</sup> *State University "Kyiv Aviation Institute"*  
*1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, 030158, Ukraine*

*The article addresses the systemic contradiction in traditional museum structures where the vast majority of valuable and rare exhibits remain hidden in storage, inaccessible to the general public. Global data indicates that only about 20% of museum funds are available for physical viewing, a situation further exacerbated by*

the COVID-19 pandemic and the ongoing armed conflict in Ukraine. The research focuses on the Museum of Magnetic Recording Technology at the Research Institute of Electromechanical Instruments (Kyiv), which houses unique specimens of Soviet and post-Soviet tape recorders that exist in single copies. To overcome the limitations of traditional digitization methods like static photography or video, the authors propose a comprehensive methodology for creating photo-realistic, fully interactive 3D models accessible directly via web browsers.

The proposed technological workflow is built exclusively on free and open-source software, making it a viable solution for budget-constrained cultural institutions. The study justifies the use of manual polygonal modeling in Blender over photogrammetry, as the latter fails to provide acceptable results for technical artifacts with complex geometries, fine functional details, and reflective surfaces. The core of the methodology involves a specialized tech stack comprising React, Three.js (via the React Three Fiber wrapper), and the Web Audio API. This combination ensures high performance, small initial loading sizes, and deep integration between the 3D scene and standard web interface elements, which is superior to the heavy builds generated by traditional game engines like Unity or Unreal Engine.

The practical application of this methodology is demonstrated through the creation of a digital twin for the “Mayak MPI40C” cassette recorder. The process encompasses the entire technological cycle: from initial reference collection and object decomposition to PBR-texturing and the implementation of Non-Linear Animations (NLA) in Blender. Within the web environment, the 3D model maintains full clickable interactivity, allowing users to press buttons, open compartments, and rotate regulators with animated feedback. A key scientific innovation presented is the method of direct audiovisual synchronization. By utilizing the AnalyserNode of the Web Audio API, real-time amplitude values are mapped to the angular position of the virtual VU-meter needles, achieving a latency of 16–33 ms, which is below the threshold of human perception.

Technical testing of the platform confirmed a stable 60 frames per second (fps) on modern devices and broad cross-browser compatibility. The final GLB file size was optimized to 4 MB, ensuring rapid delivery and interactivity. The methodology is designed to be universal and reproducible, serving as a framework for digitizing diverse museum collections and enhancing virtual heritage preservation. Future research directions include the implementation of KTX2 texture compression to further reduce file sizes and the integration of the WebXR API for augmented and virtual reality support.

**Keywords:** digital museum, 3D modeling, interactivity, web publishing, Three.js, React, GLB, non-linear animation, NLA, PBR-texturing, Web Audio API, SPA.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2026.

Submitted: 20.03.2026.

Прийнято до друку: 22.04.2026.

Accepted: 22.04.2026.

Опубліковано: 30.05.2026.

Published: 30.05.2026.



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© О. А. Бобарчук, О. О. Філіпнас