

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-19>

УДК 004.925

Кривенко Ольга Вікторівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0009-0006-2860-6575>

Балалаєва Олена Юрївна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0003-1461-4399>

Новіков Данило Євгенович, магістр

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЦИФРОВОЇ ЯКОСТІ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ В РУШІЯХ EEEVEE, CYCLES ТА LUXCORERENDER

Кривенко О.В., Балалаєва О.Ю., Новіков Д.Є. Компаративний аналіз ефективності та цифрової якості візуалізації в рушіях eeevee, cycles та luxcorerender. Стаття присвячена комплексному компаративному дослідженню ефективності, швидкодії та цифрової якості моделювання світлового середовища в сучасних системах тривимірної графіки. У роботі проведено глибокий аналіз функціонування популярних рушіїв рендерингу – Eevee, Cycles та LuxCoreRender, які істотно різняться за своєю математичною архітектурою: від методів rasterization в реальному часі до фізично коректного двонапрявленого трасування променів. Метою дослідження є визначення оптимального інструментарію для професійної візуалізації шляхом зіставлення часових витрат на обчислення та цифрової якості зображень, що оцінювалася за допомогою стандартних об'єктивних метрик PSNR та SSIM. У статті детально представлено опис методології тестування, яка охоплює рендеринг серії сцен з різним рівнем складності світлових сценаріїв та порівняння результатів на декількох апаратних конфігураціях. На основі серії експериментів із ідентичними тривимірними сценами, що моделюють інтер'єр із різними типами освітлення та матеріалів, проаналізовано вплив динамічної зміни кількості семплів на фінальну візуальну достовірність. Емпіричним шляхом авторами підтверджено, що використання різних алгоритмів освітлення суттєво змінює співвідношення між часом обробки та візуальною точністю отриманого кадру. За результатами дослідження визначено раціональний обчислювальний екстремум, який забезпечує найкращий компроміс між фізичною точністю відтворення складних оптичних явищ, таких як каустика, рефракція та глобальне освітлення, і загальною часовою складністю системи. Запропоновані методичні рекомендації щодо вибору рушія та гнучкого налаштування параметрів рендерингу дозволяють ефективно стандартизувати процедури тестування, що критично важливо для оптимізації робочих процесів у сучасних графічних конвеєрах при розробці складних візуальних проєктів, де баланс швидкості та якості є визначальним фактором для досягнення бажаного результату.

Ключові слова: рендеринг, рушії, тривимірна візуалізація, якість освітлення, Eevee, Cycles, LuxCoreRender, PSNR, SSIM.

Kryvenko O., Balalaieva O., Novikov D. A Comparative Analysis of Performance and Visual Quality in the Eevee, Cycles, and LuxCoreRender Engines. The article is devoted to a comprehensive comparative study of the efficiency, speed, and digital quality of lighting environment modeling in modern 3D graphics systems. The work provides an in-depth analysis of the functioning of popular rendering engines – Eevee, Cycles, and LuxCoreRender, which differ significantly in their mathematical architecture: from real-time rasterization methods to physically accurate bidirectional ray tracing. The study aims to determine the optimal toolkit for professional visualization by comparing the time costs of computation with the digital quality of images, which was evaluated using standard objective metrics, PSNR and SSIM. The article provides a detailed description of the testing methodology, which encompasses rendering a series of scenes with varying complexity of light scenarios and comparing results across several hardware configurations. Based on a series of experiments with identical 3D scenes modeling an interior with different types of lighting and materials, the impact of dynamically changing the number of samples on final visual fidelity is analyzed. Empirically, the authors confirmed that using different lighting algorithms significantly alters the ratio between processing time and the visual precision of the resulting frame. As a result of the study, a rational computational extremum is determined, which provides the best compromise between the physical accuracy of reproducing complex optical phenomena, such as caustics, refraction, and global illumination, and the overall time complexity of the system. The proposed methodological recommendations regarding engine selection and flexible configuration of rendering parameters allow for effective standardization of testing procedures, which is critical for optimizing workflows in modern graphics pipelines when developing complex visual projects where the balance of speed and quality is the determining factor for achieving the desired result.

Keywords: rendering, engine, 3D visualization, lighting quality, Eevee, Cycles, LuxCoreRender, PSNR, SSIM.

Актуальність проблеми. На сьогоднішній день сучасні технології тривимірного моделювання та комп'ютерної графіки характеризуються стрімким розвитком алгоритмів генерації зображень, при цьому можна виділити існування двох паралельних обчислювальних парадигм: rasterization у реальному часі та фізично коректного офлайн-рендерингу. Наразі спостерігається глобальна тенденція до зближення цих раніше ізольованих напрямів, що обумовлено стрімким прогресом архітектури графічних процесорів та застосуванням нових методів фільтрації та деноїзингу. Слід зазначити, що рушії реального часу все частіше імплементують елементи гібридного трасування променів задля досягнення більшої реалістичності результуючого зображення, а офлайн-рушії при

цьому спрямовують увагу на оптимізацію власних інтеграційних схеми під високопаралельні обчислення на GPU з метою мінімізації часових витрат на рендеринг.

Важливим завданням є вибір оптимального інструментарію для комп'ютерної візуалізації, дозволяв би досягнути раціонального компромісу між часовою складністю системи та фізичною точністю відтворення світлового середовища. Особливо гостра дана проблема постає під час моделювання сцен із високою щільністю непрямого освітлення, складними процесами рефракції, дзеркальними перевідбиттями та каустичними ефектами, що пов'язано зі схильністю спрощених алгоритмів накопичувати величину похибки та поступово погіршувати цифрову якість зображення.

Для дослідження цієї тенденції доцільно використати зокрема відкрите програмне забезпечення Blender, яку дозволяє проаналізувати роботу рушії, які принципово відрізняються за математичною архітектурою. Наприклад, це вбудований растеризатор Eevee, універсальний трасувальник променів Cycles з підтримкою інтеграції сторонніх фізично коректних систем, а також LuxCoreRender з функціонуванням на базі двонапрявленого трасування променів і метрополіс-семплювання.

Незважаючи на наявність широкого інструментарію для рендерингу спостерігається недостатній розвиток науково обґрунтованих та формалізованих методик оцінки ефективності алгоритмів та методичних рекомендацій щодо розмежування сфери застосування різних рушіїв.

Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю проведення комплексного компаративного аналізу сучасних обчислювальних рушіїв рендерингу на основі оцінки якісних параметрів зображень за допомогою цифрових метрик PSNR та SSIM, що дозволить сформулювати уніфікований методологічний базис для стандартизації процедур тестування та оптимізації процесів комп'ютерної візуалізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У роботі [1] наведено теоретичний базис фізично обґрунтованого рендерингу та математичного моделювання оптичних явищ за допомогою інтегрального рівняння світлового переносу. Авторами M. Pharr, W. Jakob та G. Humphreys надано класифікацію методів обчислення тривимірних сцен, а також наведено математичну модель стохастичного чисельного інтегрування Монте-Карло, що використовується для розрахунку інтеграла освітленості. У даній праці чітко розмежовано концепції упереджених та неупереджених обчислювальних алгоритмів, а також науково обґрунтовано механізм вибірки за важливістю, який раціонально застосовувати для оптимізації алгоритмів сучасних офлайн-трасувальників променів. Наведене дослідження можна використовувати як теоретичне підґрунтя для більш глибокого розуміння та аналізу розбіжностей між Cycles та LuxCoreRender.

У статті [2] докладно розглянуто питання практичної реалізації алгоритмів растеризації у режимі реального часу в умовах обмеженого часового ресурсу. Авторами M. Mara, M. McGuire, D. Nowrouzezahrai та D. Luebke досліджено архітектуру глибоких G-буферів у застосуванні до завдання стабілізації екранно-просторових апроксимацій непрямого освітлення та кубічних карт відображень. У роботі зроблено висновки, що алгоритми растеризації, аналогічні за структурою конвеєру рушія Eevee, дозволяють максимізувати швидкість за рахунок використання даних поточного кадру, хоча при цьому виявлено залежність від екранного простору. Дане дослідження дозволяє проаналізувати фізичні обмеження наведених методів, у тому викривленням затінення та втратою точності відтворення геометричних відображень у зонах, де об'єкти-джерела світла виходять за межі видимості камери.

У роботі [3] J. Bikker та J. van Schijndel провели аналіз механізмів впровадження методів стохастичного трасування шляху в конвеєрі масового застосування. Дане завдання є важливою з точки зору подолання обмежень растеризації шляхом створення гібридних обчислювальних схем та інтеграцію трасування променів у реальному часі. Авторами докладно розглянуто проблему виникнення шуму при низькій кількості семплів, при цьому запропоновано використання інтелектуальних просторово-темпоральних денойзерів на базі нейронних мереж для вирішення поставленої проблеми. Авторами доведено, що такий підхід дозволяє знизити зернистість зображення без експоненційного збільшення кількості променів та досягти. Результати даного дослідження можна використовувати для обґрунтування високої обчислювальної збалансованості і швидкості збіжності рушія Cycles при помірних часових витратах.

Стаття [4] спрямована на розробку математичного апарату для точне моделювання складних світлових явищ у гетерогенних середовищах та на оптичних інтерфейсах. У роботі вперше запропоновано інтеграцію алгоритму метрополіс-семплювання з двонапрявленим трасуванням

променів. Авторами науково доведено низька ефективність застосування стандартних однопотікових методів для оптичних сценаріїв із глибокими тінями та каустикою та складними геометричними заломленнями. Запропоноване E. Veach та L. J. Guibas рішення дозволило забезпечити стрімку математичну збіжність алгоритму на складних ділянках, що є важливим для проведення експериментального дослідження рушія LuxCoreRender та подальшої інтерпретації високих значень метрик якості.

У роботі [5] авторами надано власне розв'язання проблеми суб'єктивної оцінки якості згенерованих зображень шляхом впровадження індексу структурної подібності (SSIM), при цьому авторами докладно обґрунтовано обмеженість метрики PSNR, яка попри розрахунок абсолютної середньоквадратичної помилки яскравості не дозволяє врахувати людське сприйняття зображення. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh та E. P. Simoncelli запропонували алгоритм SSIM, який здійснює аналіз збереження локальних контрастів, структурних градієнтів та чіткості меж об'єктів. Дане дослідження дозволило нам більш чітко інтерпретувати в представленій роботі причини зниження показника PSNR та стабільності SSIM за умови зменшення кількості семплів.

Стаття [6] наводить приклад використання в дослідженнях іншої метрики – FLIP. Авторами P. Andersson, J. Jimenez, J. Hasselgren, H. Tomanek, T. Akenine-Möller та J. Nilsson розроблено та протестовано модель людської зорової системи, яка дозволяє виявляти розбіжності у градієнтах тіней та текстурних артефактах. Дослідження з використанням метрики FLIP показало, що локалізований стохастичний шум у глибоких тінях та зонах рефракції сприймається оком критичніше, ніж рівномірна втрата чіткості, що можна використати при дослідженні рушіїв Cycles та Eevee за умови низької кількості семплів.

У роботі [7] наведено результати розробки та тестування комбінованого графічного рушія Dual-Renderer Engine, а також проведено пряме кількісне зіставлення класичного конвеєра rasterизації OpenGL PBR та SSIM. Автором експериментально доведено перевагу трасування шляху у відтворенні м'яких тіней та дифузного непрямого освітлення. Водночас у статті показано, що впровадження інтерактивного Path Tracing навіть за умов використання просторово-темпоральних денойзерів призводить до збільшення витрат відеопам'яті GPU на 75%. Дане дослідження є корисним для пояснення специфіки апаратної збалансованості рушіїв типу Cycles.

Стаття [8] представляє глибокий математичний аналіз інтегральних моделей переносу світла та коректності функцій розподілу двоспрямованої відбивної здатності у рендер-системах. Дослідження авторів J. Křivánek, I. Georgiev, T. Nishisaka, P. Vévoda, M. Šik, D. Nowrouzezahrai та W. Jarosz показує, що лише перехід до неупереджених методів стохастичного трасування променів дозволяє забезпечити абсолютну фізичну точність і збалансованість рендерингу, що є ключовим аргументом на користь використання таких рушіїв, як Cycles та LuxCoreRender, які буде розглянуто у нашій роботі.

Таким чином, аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що незважаючи на глибоке вивчення ізольованих математичних моделей rasterизації та трасування наразі існує дефіцит уніфікованих методологій, які б дозволяли проводити відтворюване кількісне тестування різних рушіїв різних з подальшою оцінкою їх ефективності та цифрової якості візуалізації.

Мета дослідження. провести комплексний компаративний аналіз ефективності, швидкодії та цифрової якості моделювання світлового середовища в рушіях рендерингу Eevee, Cycles та LuxCoreRender з використанням метрик PSNR та SSIM.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Для проведення компаративного аналізу ефективності візуалізації було обрано 3 рушії: Eevee, Cycles та LuxCoreRender.

Eevee – вбудований у Blender рушія реального, який функціонує на базі технології rasterизації OpenGL. Для досягнення мінімізації часових витрат в ньому застосовано методи екранного простору та алгоритми попередньо розрахованого непрямого освітлення. Пріоритетними завданнями даного є висока швидкість та інтерактивність, які превалюють над абсолютною фізичною точністю відтворення світла.

Натомість рушія Cycles є універсальним трасувальником променів, що здійснює неупереджене фізично коректне обчислення освітлення шляхом світлових потоків за допомогою стохастичного трасування променів, що дозволяє досягти максимальної точності відтворення реальних оптичних явищ.

LuxCoreRender, як і Cycles, належить до фізично коректних рушіїв, при цьому даний рендер базується на сучасних математичних алгоритмах, які дозволяють з високою точністю моделювати

широкий спектр світлових явищ, недоступних для відтворення в більшості інших програм. У даному рушії реалізовано підтримку двонапрявленого трасувальника променів у поєднанні з метрополіс-семплюванням, що дає змогу ефективно візуалізувати навіть найскладніші сценарії освітлення (наприклад, каустичні ефекти, складне внутрішнє перевідбиття світла тощо).

З метою проведення експериментального порівняння якості формування освітлення було підготовано набір тестових сцен, що містять типові світлові умови. Базовою тестовою сценою обрано інтер'єр із різноспрямованими світловими потоками та різними матеріалами (рис. 1). Додатково для аналізу відбиттів, заломлень і каустичних явищ до експерименту було включено сцени з прозорими та дзеркальними об'єктами. Використання спільного набору сцен забезпечує єдину основу для порівняння - кожен рушії рендерить одну й ту саму ситуацію, що дозволяє напряму зіставити результати.

У ході дослідження всі обрані рушії здійснювали рендеринг ідентичних тривимірних сцен із однаковими параметрами геометрії, оптичними властивостями матеріалів, просторовим розташуванням камер та конфігурацією джерел світла, що дозволило виконати зіставлення та верифікацію отриманих результатів.

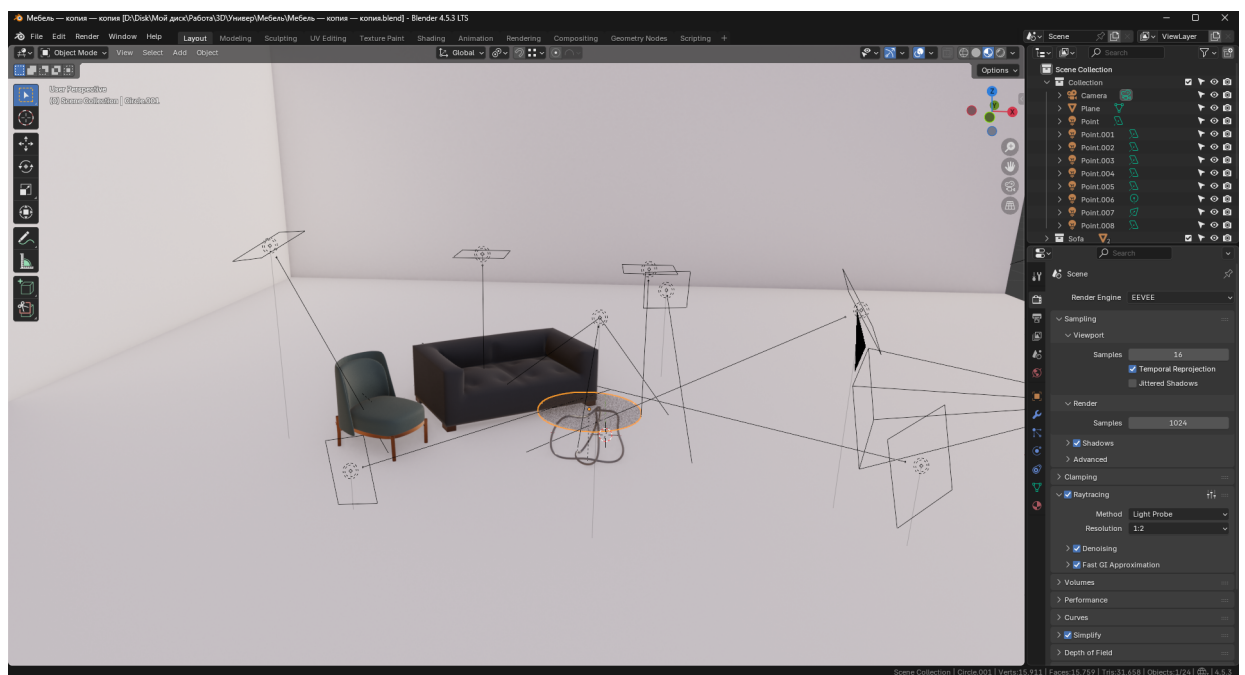


Рис. 1– Тестова сцена в режимі Material preview

Для підвищення якості зображення та дослідження потужності кожного рушія було застосовано індивідуальні налаштування, при цьому зміни до тестових сцен не вносилися. Наприклад, для Eevee акцент був зроблений на активізації усіх доступних параметрів для досягнення максимального рівня візуальної достовірності в режимі реального часу. Це включає активацію наступних функцій: Ambient Occlusion (затемнення від оточення), ефект Bloom (світіння), Screen Space Reflections/Refractions (відбиття/заломлення у екранному просторі), а також суттєве збільшення розміру тінювих карт та вибір високих налаштувань для непрямого освітлення.

На противагу методам рендерингу в реальному часі, для Cycles та LuxCoreRender застосовували фіксацію ключових параметрів, які безпосередньо впливають на фінальний результат візуалізації, з метою забезпечення максимально об'єктивного зіставлення їхньої продуктивності та якості зображення. Одними із таких критичних параметрів є кількість семплів (samples), що визначає рівень деталізації та зменшення шуму, а також глибина променів (ray depth), що встановлює максимальну кількість відбиттів та заломлень світлового променя, забезпечуючи тим самим коректну обробку складної глобальної ілюмінації та взаємодії світла з матеріалами. За необхідності для досягнення чистого зображення після завершення рендерингу здійснювали активацію денойзингу (зменшення шуму). Слід зазначити, що даний інструмент застосовується лише для післяобробки знімків, щоб усунути залишковий шум від семплінгу без втручання безпосередньо у процес трасування. LuxCoreRender також потребував більшої кількості

налаштувань, при цьому виникла необхідність повністю переробляти матеріали для коректної роботи рушія.

Необхідно підкреслити, що безпосереднє зіставлення абсолютних показників рушія Eevee та систем трасування шляху не було можливим через фундаментальну розбіжність їхніх алгоритмічних підходів. Однак рендеринг уніфікованих тестових сцен надав можливість здійснити комплексну оцінку характеру відмінностей між методами рендерингу в реальному часі та автономними обчисленнями.

В якості критеріїв проведення комплексного порівняльного аналізу ефективності вищезазначених рушіїв рендерингу обрано:

а) час рендерингу (t) – сумарний час для отримання фінального зображення сцени при заданих налаштуваннях якості, при цьому для кількісної оцінки часу фіксується або середній час кадру (для анімацій), або час одноразового рендеру кадру (для статичних сцен) на даній апаратній конфігурації;

б) якість відтворення освітлення та оптичних явищ – точність моделювання прямого та непрямого освітлення, дифузного перевідбиття, геометрична коректність тіней, а також візуалізація каустики, заломлення та дисперсії світла у прозорих середовищах;

в) рівень стохастичного шуму – показник чистоти зображення за низької щільності семплінгу, що визначає схильність рушія до утворення випадкової зернистості у напівтінях та оцінює ефективність інтегрованих алгоритмів шумозаглушення;

г) метрики цифрової якості зображень:

– пікове відношення сигналу до шуму (PSNR) – оцінює середньоквадратичну помилку між кольорними каналами тестового кадру та референсного еталона (вищі значення свідчать про точніше наближення до фізичного референсу, а показники більше ніж 40 дБ вказують на повну візуальну ідентичність);

– індекс структурної подібності (SSIM) – математична метрика, що моделює сприйняття людської зорової системи й аналізує локальні зміни структури, контрасту та яскравості (індекс лежить в діапазоні від 0 до 1, при цьому значення в межах $0.95-1.0$ інтерпретуються як високий рівень структурної відповідності оригіналу).

Для проведення експерименту параметри сцени (положення камери, світильників, матеріали) залишалися незмінними для всіх запусків, при цьому роздільна здатність рендеру для всіх рушіїв встановлювалася 1920×1080 px.

Рендеринг еталона. Для сцени було згенероване еталонне зображення високої якості (рис 2). У LuxCore виконувався рендеринг з великою кількістю семплів (5000 семплів, доки зображення практично повністю не позбавлялося шуму), при цьому весь важливий спектр функціональних можливостей програмного модуля було активовано (каустики, повна глибина трасування, відсутність спрощень тощо).



Рис. 2 – Еталон у LuxCore для 5000 семплів

Тривалість рендерингу еталонного зображення становила 02:13:28.11, що було визначено як допустима межа обчислювального часу. Візьмемо цю величину як максимально допустимий час. Експеримент передбачав рендеринг тестової сцени кожним з трьох рушіїв.

Eevee. Для дослідження рушія Eevee було виконано фінальний рендеринг сцени за максимальних параметрів дискретизації (1024 семпли) із залученням усіх доступних параметрів підвищення якості графіки. У процесі тестування фіксувалася тривалість генерації зображення (табл. 1), яка зазвичай характеризується мінімальними часовими витратами (у межах часток секунди).

Аналіз отриманих даних підтвердив високу швидкість генерації кадрів рушієм Eevee, проте точність розрахунку фізичних властивостей світлового середовища залишилася обмеженою. Зокрема, спостерігалася надмірна геометрична чіткість тіней, слабка інтенсивність відбиттів на скляних поверхнях, а також спрощена модель розрахунку глобального освітлення (Global Illumination) за повної відсутності цифрового шуму (рис. 3).



Рис. 3 – Рендеринг сцени на Eevee для 1024 семплів

На наступному етапі дослідження кількості семплів було зменшено до 128 з метою оцінювання динаміки зміни якісних показників візуалізації (табл. 1). Зменшення вибірки зумовило скорочення часу рендерингу, що, водночас, призвело до суттєвої деградації якості зображення. Наприклад, зафіксовано зростання рівня артефактів та високочастотного шуму, переважно на ділянках зі складною оптичною геометрією, зокрема на скляних поверхнях (рис. 4).

На рис. 4 видно, що на скляній поверхні моделі стола візуалізується характерний стохастичний шум, а саме зернистість та і випадкові яскраві й темні плями в зонах рефракції та відбиттів. Даний ефект зумовлений недостатньою щільністю трасування променів (семплювання) у гібридному алгоритмі Ray Tracing (RT). За умов використання низької кількості семплів (128 і менше) обчислювальний алгоритм не забезпечує точної апроксимації складних траєкторій світлових променів крізь напівпрозорі середовища. Це генерує високочастотний шум, механізм виникнення якого подібний до методу Path Tracing, проте обмежений виключно RT-компонентами без урахування повноцінного GI. Амплітуда шуму зростає на контурах і вигинах металевої основи, де перетинаються рефракція та відбиття.

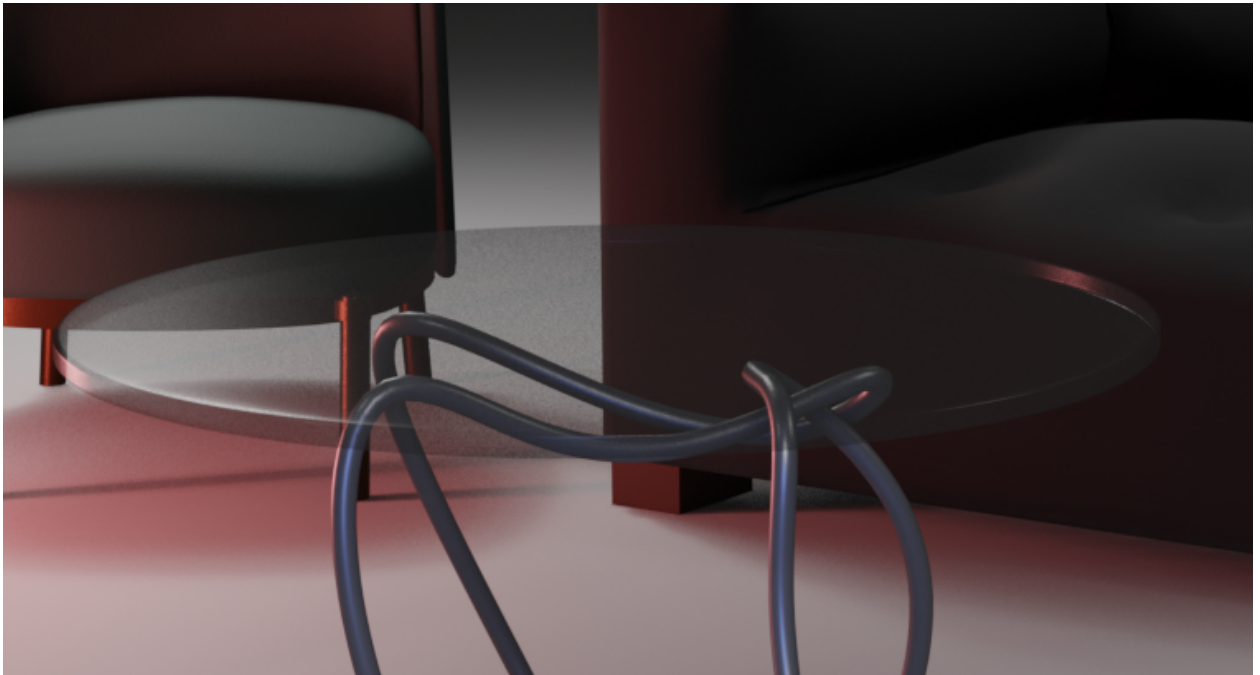


Рис. 4 – Приклад збільшення шумів при рендерингу сцени на Eevee для 128 семплів

Заключний етап тестування шумів Eevee передбачав збільшення кількості семплів до 3000 з метою максимального наближення отриманого зображення до еталону. Отримані результати (рис. 5) свідчили про збільшення кількості семплів призвело до покращення цифрової якості візуалізації, проте непропорційно відносно експоненційного зростання витраченого часу (табл. 1).



Рис. 5 – Рендеринг сцени на Eevee для 3000 семплів

Таблиця 1 – Показники візуалізації шумів Eevee

Рух	Семпли	Час	PSNR	SSIM
Eevee	1024	00:09.26	27,80 дБ	0,8551
	128	00:01.54	22,63 дБ	0,8537
	3000	00:44.00	28,73дБ	0,8552

Cycles. Для дослідження рушія Cycles було послідовно встановлено 128, 1024 та 3000 семплів при збереженні стандартних базових налаштувань інтегратора (без примусової активації розрахунку каустичних ефектів). З метою мінімізації високочастотного шуму та підвищення чистоти фінального кадру після завершення рендеру застосовували denoising – нейромережевий алгоритм фільтрації. У ході експерименту фіксували загальний час рендерингу кожного кадру, а результуючі зображення експортувалися для подальшого аналізу та порівняння характеристик.

Аналіз отриманих результатів для 1024 семплів показав недостатність обсягу вибірки для повного асимптотичного наближення отриманого зображення до еталону (рис. 6), при цьому кількісні показники візуалізації залишилися достатньо високими.



Рис. 6 – Рендеринг сцени на Cycles для 1024 семплів

На наступному етапі експерименту кількість семплів було знижено до 128 з метою дослідження зниження якості рендерингу та витрат обчислювального часу (табл. 2). Закономірним наслідком цього стало суттєве скорочення часових витрат на рендеринг. Водночас зафіксовано незначне зниження якісних показників зображення та його відхилення від еталону, що підтверджується значеннями метрик PSNR та SSIM (табл. 2).

Важливим етапом експерименту був аналіз функціонування алгоритму шумозаглушення (denoiser) при невеликій кількості семплів. Результати дослідження показали, що інтегральний рівень дисперсійних шумів практично не зріс, а утворення артефактів, спричинених роботою деноїзера, не зафіксовано (рис. 7).

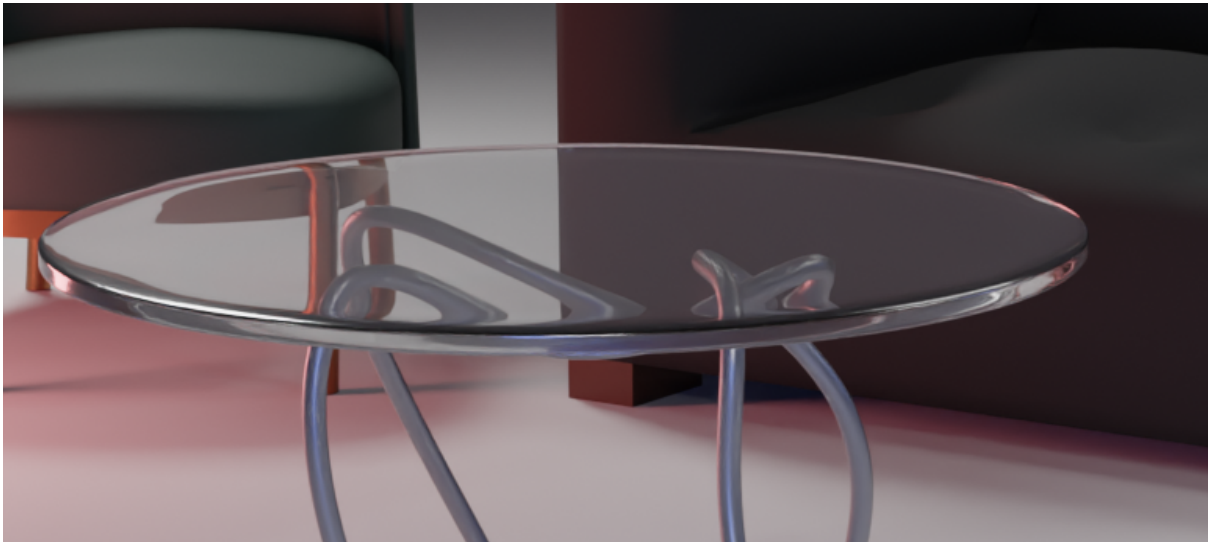


Рис. 7 – Приклад роботи деноізера в Cycles для 128 семплів
 На завершальному етапі тестування Cycles кількість семплів було збільшено до 3000 (рис. 8).



Рис. 8 – Рендеринг сцени на Cycles для 3000 семплів

Таблиця 2 – Показники візуалізації рушія Cycles

Рушій	Семпли	Час	PSNR	SSIM
Cycles	1024	00:37.61	35,87 дБ	0,8491
	128	00:11.26	32,08 дБ	0,7846
	3000	01:08.26	38,27 дБ	0,9376

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок, що рушій Cycles демонструє високу ефективність та стабільну збіжність алгоритмів при збільшенні кількості семплів, послідовно наближаючись до показників еталона, хоча він і не забезпечує абсолютної фізичної коректності при відтворенні складних оптичних явищ.

LuxCore. Для дослідження рендерингу за допомогою рушія LuxCore (через відповідний програмний інтерфейс інтеграції в середовище Blender) було активовано режим трасування шляху (Path). Кількість семплів встановлювали еквівалентно до параметрів тестування рушіїв Eevee та Cycles – 128, 1024 та 3000 (табл. 3). У процесі рендерингу фіксували загальний час та метрики якості зображення, а результуючі зображення зберігалися для подальшого аналізу (рис. 9).



Рис. 9 – Рендеринг сцени на LuxCore для 1024 семплів

Через алгоритмічну специфіку рушія було зафіксовано значне зростання часу рендерингу, при цьому спостерігалось підвищення значень метрик PSNR та SSIM, які максимально наблизилися до ідеалу (табл. 3). Візуальний аналіз отриманих результатів показав значне збільшення деталізації та підвищення реалістичності освітлення й каустичних ефектів на склі. Проте на прозорих ділянках поверхонь було виявлено незначний стохастичний шум, що обумовлено особливістю математичних інструментів інтегратора LuxCore (рис. 10).

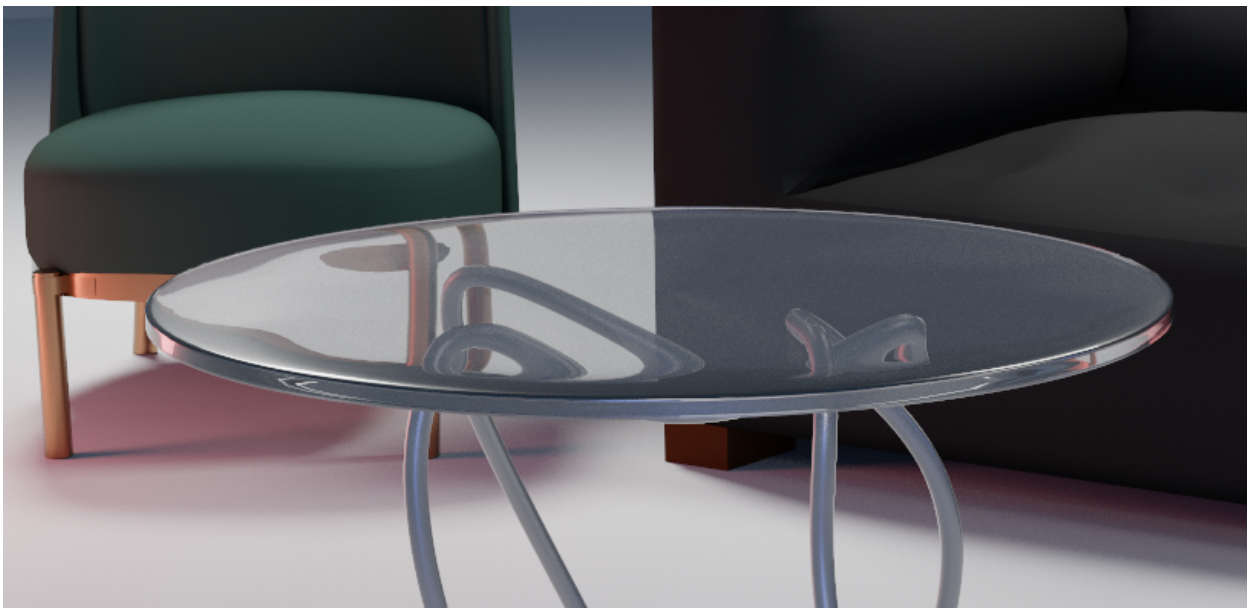


Рис. 10 – Робота деноїзера в LuxCore для 1024 семплів

У наступному тесті кількість семплів було зменшено до 128, при цьому закономірно спостерігалось скорочення часові витрати на процес рендерингу. Було встановлено, що значення метрики PSNR значно знизилась, тоді як індекс SSIM залишився на відносно стабільному рівні (табл. 3). Виявлена розбіжність у поведінці метрик пояснюється тим, що зменшення кількості семплів призвело до збільшення високочастотного шуму, при цьому глобальне освітлення не зазнало негативних змін (рис. 11).



Рис. 11 – Рендеринг сцени на LuxCore для 128 семплів

Візуальний аналіз отриманих зображень свідчать про суттєве збільшення рівня шуму, локалізованого на скляних поверхнях та в зонах формування тіней (рис. 12), що підтверджує результати розрахунку метрик.

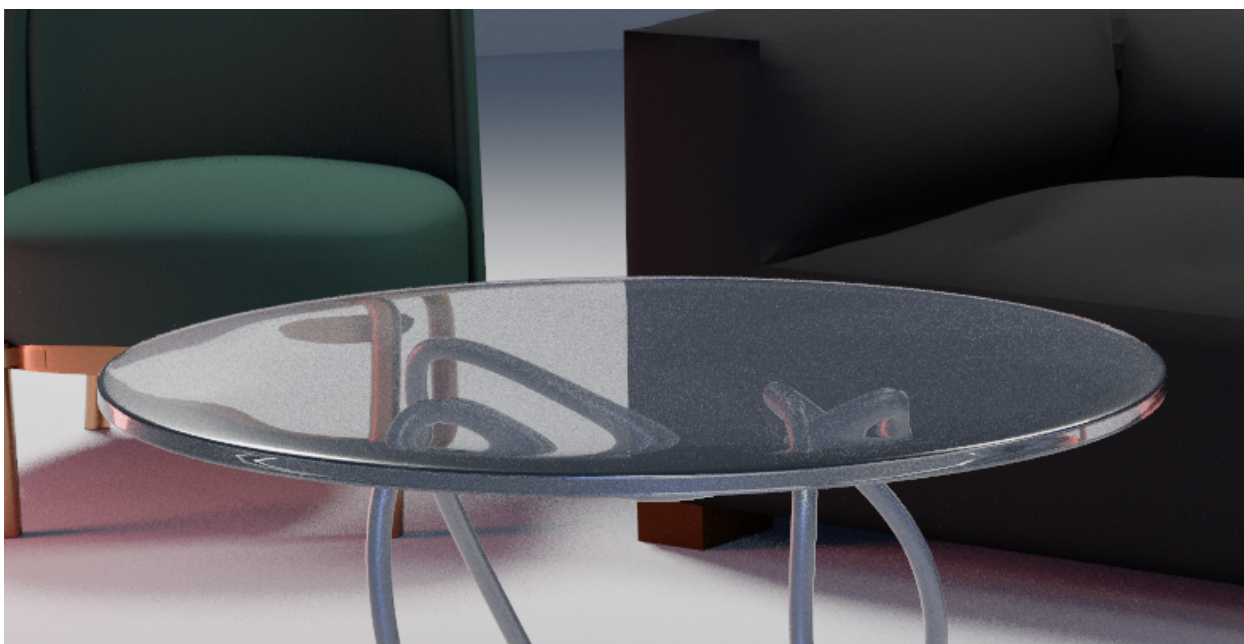


Рис. 12 – Шум на LuxCore для 128 семплів

Завершальний етап тестування був спрямований на максимальне результату наближення до параметрів еталона за показниками цифрової якості візуалізації та загальним часом процесу рендерингу, для чого кількість семплів було збільшено до 3000 (рис. 13, табл. 3).



Рис. 13 – Рендеринг сцени на LuxCore для 3000 семплів

Зі збільшенням кількості семплів спостерігається експоненційне зростання загального часу обчислень, який практично досяг значення межі генерації еталона, при цьому розрахункові значення метрик показують максимальну конвергенцію з еталонними показниками. Порівняльний аналіз показав, що низькоамплітудний стохастичний шум, зафіксований для 10124 семплів, практично повністю відсутній при підвищенні кількості семплів до 3000 (рис. 14).

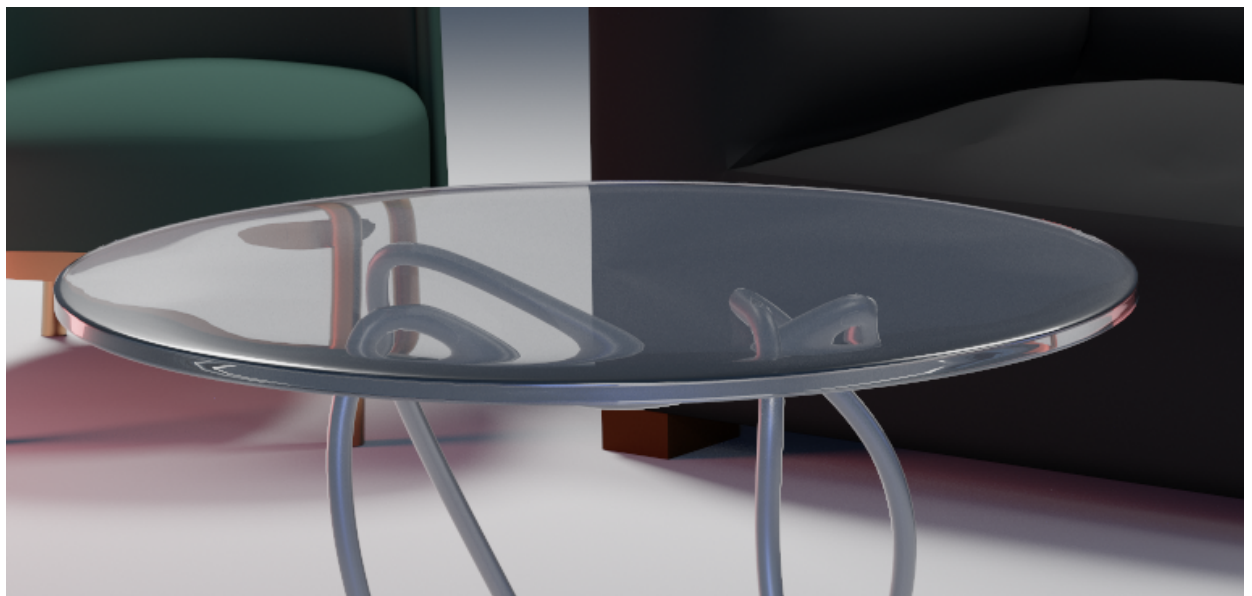


Рис. 14 – Робота деноїзера в LuxCore для 3000 семплів

Таблиця 3 – Показники візуалізації рушіїв LuxCore

Рушій	Семпли	Час	PSNR	SSIM
LuxCore	1024	34:10.56	49,05 дБ	0,9893
	128	06:18.21	40,31 дБ	0,9284
	3000	1:39:08.89	50,18 дБ	0,9968

На основі отриманих експериментальних даних було формалізовано характер залежності між кількістю семплів, метриками якості (PSNR, SSIM) та часом процесу рендерингу (рис. 15–16).

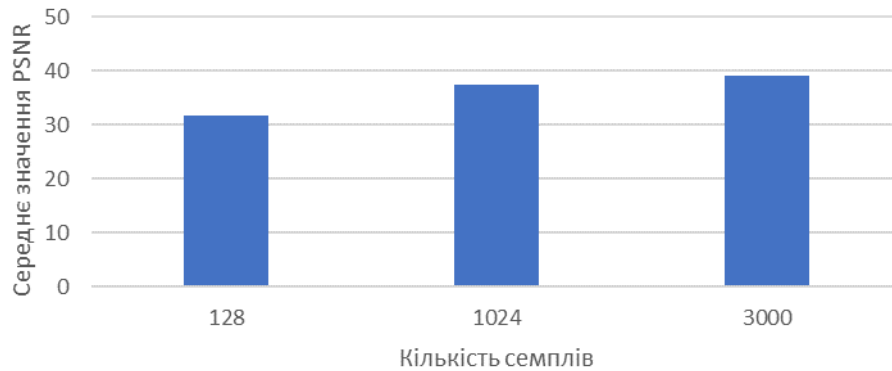


Рис.15 – Залежність середнього значення PSNR від кількості семплів

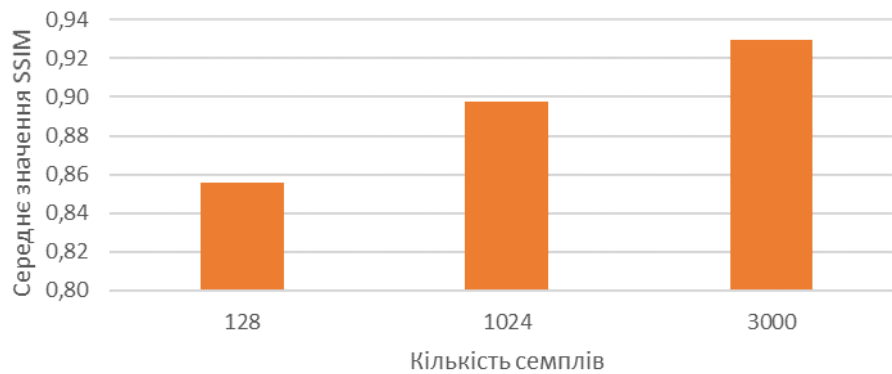


Рис. 16 – Залежність середнього значення SSIM від кількості семплів

Зі збільшенням кількості семплів в діапазоні від 128 до 3000 семплів фіксується монотонне зростання PSNR та SSIM. Таким чином, збільшення кількості семплів дозволяє мінімізувати дисперсію високочастотного стохастичного шуму та підвищити рівень деталізації елементів. Встановлено, що приріст цифрової якості в інтервалі від 1024 до 3000 семплів є суттєво меншим і непропорційним порівняно з інтенсивним стрибком метрик на початковому етапі – від 128 до 1024 семплів.

Зростання кількості семплів експоненційно збільшує час рендерингу, що обумовлено лінійним підвищенням кількості трасованих променів або обчислювальних операцій, що потребує значного залучення апаратних ресурсів (рис. 17–18).

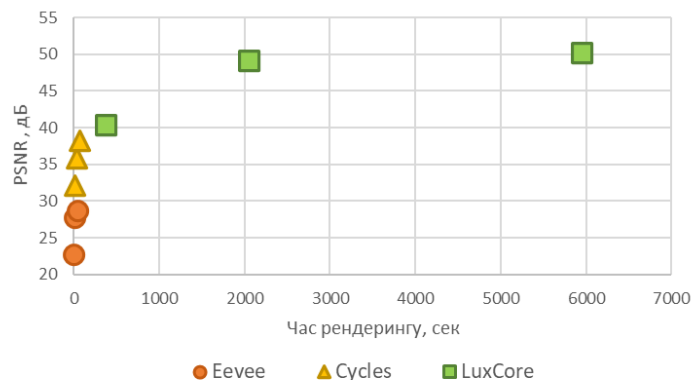


Рис. 17 – Залежність метрики PSNR від часу рендерингу для досліджуваних рушіїв

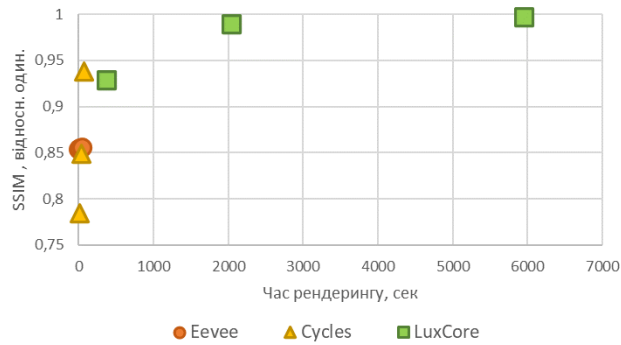


Рис. 18 – Залежність метрики SSIM від часу рендерингу для досліджуваних рушіїв

Експериментальне дослідження підтвердило наявність прямої кореляції між кількістю семплів, якістю зображення та часом обробки. Оптимізація вибору кількості семплів полягає в знаходженні компромісу між цільовою реалістичністю зображення та обмеженнями часового ресурсу. Проведений аналіз показав, що раціональним екстремумом («золотою серединою») для досліджуваних сцен є обсяг у 1024 семпли, що забезпечує високу якість отриманого зображення, наближеного до еталона, за умов збереження прийнятних витрат часу на процес рендерингу.

Отримані результати дозволили встановити, що експоненційне зростання тривалості процесу рендерингу зумовлює монотонне підвищення показників PSNR та SSIM, що свідчить про покращення цифрової якості візуалізації. Дана тенденція найбільш чітко прослідковується для рушія LuxCoreRender, який забезпечує максимальні значення вищезазначених метрик, проте потребує значно більших часових витрат.

На основі усереднених емпіричних показників надано порівняльну оцінку ефективності роботи досліджуваних рушіїв за критеріями часу та якості отриманих зображень. Рушієв Eevee характеризується мінімальною обчислювальною складністю та забезпечує найвищу швидкість серед аналізованих систем, проте демонструє найнижчі дескриптори якості. (середня тривалість генерації кадру – $t = 18,27$ сек, середні значення метрик – PSNR = 26,35 дБ та SSIM = 0,8547). Рушієв Cycles демонструє збалансоване співвідношення між часом рендерингу та якісними параметрами візуалізації ($t = 39,04$ сек, PSNR = 35,41 дБ та SSIM = 0,8571). Рушієв LuxCoreRender забезпечує найвищі показники реалістичності та точної відповідності еталону, при цьому потребуючи значних апаратних ресурсів та часових витрат ($t = 2792,55$ сек, PSNR = 46,51 дБ та SSIM = 0,9715).

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У статті наведено результати компаративного аналізу ефективності та цифрової якості візуалізації для рушіїв Eevee, Cycles та LuxCoreRender. Експериментальне дослідження показало, що рушієв Eevee продемонстрував найвищу продуктивність, проте через застосування методів растеризації в екранному просторі не забезпечує суворої енергетичної збалансованості розрахунків. У наслідок цього Eevee має найнижчі показники якості, що обмежує його застосування лише завданнями, де фізична точність є вторинною щодо швидкості. Рушієв Cycles показав найбільш збалансовані результати в межах розглянутої задачі, забезпечивши високу якість зображення при помірних часових витратах. Cycles є оптимальним вибором, наприклад, для художньої та комерційної візуалізації, де необхідний компроміс між продуктивністю та фізичною достовірністю. Рушієв LuxCoreRender можна вважати еталонною системою для прецизійної науково-технічної візуалізації, що досягається завдяки використанню двонапрявленого трасування та метрополіс-семплювання. Слід зауважити, що хоча LuxCoreRender потребує значних обчислювальних ресурсів, він забезпечує максимальну конвергенцію з фізичним еталоном, що є важливим за наявності високих вимог до точності відтворення складних оптичних явищ.

На основі отриманих емпіричних даних зроблено висновок, що при кількості семплів до 1024 якість зображення за метриками PSNR та SSIM стабільно покращується, проте подальше підвищення кількості семплів до 3000 є недоцільним через експоненційне зростання часу рендерингу при мінімальній прирості візуальної якості.

Перспективним напрямом застосування отриманих результатів експерименту наукових є створення уніфікованого базису для об'єктивного аналізу систем комп'ютерної графіки. На основі узагальнених емпіричних даних авторами розроблено методичні рекомендації, що забезпечують високий рівень відтворюваності та об'єктивності для подальших досліджень у сфері тривимірної

візуалізації. Методика містить чіткий опис процедур вимірювання якісних показників моделювання світлового середовища, включаючи уніфікований набір тестових сцен, стек об'єктивних метрик, а також регламент проведення експерименту із зазначенням апаратних вимог та необхідних налаштувань налаштуваннями.

Список бібліографічного опису

1. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. 3rd ed. Prague : Czech Technical University in Prague, 2018. 1266 p. URL: https://cw.fel.cvut.cz/b221/_media/courses/b4m39rso/lectures/physically_based_rendering_third_edition.pdf (date of access: 20.05.2026).
2. Mara M., McGuire M., Nowrouzezahrai D., Luebke D. Deep G-Buffers for Stable Screen-Space Global Illumination. High-Performance Graphics. 2016. Vol. 1. № 1. P. 87–98. URL: https://research.nvidia.com/publication/2016-06_deep-g-buffers-stable-global-illumination-approximation (date of access: 20.05.2026).
3. Bikker J., van Schijndel J. The Brigade Renderer: A Path Tracer for Real-Time Games. International Journal of Computer Games Technology. 2013. Vol. 2013. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/578269>.
4. Veach E., Guibas L. J. Metropolis Light Transport. SIGGRAPH '97. 1997. P. 65–76. DOI: <https://doi.org/10.1145/258734.258775>.
5. Wang Z., Bovik A., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. № 4. P. 600–612. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>.
6. Andersson P., Nilsson J., Akenine-Möller T., Fairchild M. D. FLIP: A Difference Evaluator for Alternating Images. Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2020. Vol. 3. № 2. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1145/3406183>.
7. Báscones Zamora H. Hardware accelerated path tracing for real time applications : Bachelor thesis. Barcelona : Polytechnic University of Catalonia, 2025. URL: <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/7534d9b0-dd2e-4038-b718-4cd2ac92b473> (date of access: 21.05.2026).
8. Recent advances in light transport simulation: some theory and a lot of practice / J. Krivánek et al. SIGGRAPH '14. 2014. Art. 17. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1145/2614028.2615438>.

References

1. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. 3rd ed. Prague : Czech Technical University in Prague, 2018. 1266 p. URL: https://cw.fel.cvut.cz/b221/_media/courses/b4m39rso/lectures/physically_based_rendering_third_edition.pdf (date of access: 20.05.2026).
2. Mara M., McGuire M., Nowrouzezahrai D., Luebke D. Deep G-Buffers for Stable Screen-Space Global Illumination. High-Performance Graphics. 2016. Vol. 1. № 1. P. 87–98. URL: https://research.nvidia.com/publication/2016-06_deep-g-buffers-stable-global-illumination-approximation (date of access: 20.05.2026).
3. Bikker J., van Schijndel J. The Brigade Renderer: A Path Tracer for Real-Time Games. International Journal of Computer Games Technology. 2013. Vol. 2013. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/578269>.
4. Veach E., Guibas L. J. Metropolis Light Transport. SIGGRAPH '97. 1997. P. 65–76. DOI: <https://doi.org/10.1145/258734.258775>.
5. Wang Z., Bovik A., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. № 4. P. 600–612. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>.
6. Andersson P., Nilsson J., Akenine-Möller T., Fairchild M. D. FLIP: A Difference Evaluator for Alternating Images. Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2020. Vol. 3. № 2. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1145/3406183>.
7. Báscones Zamora H. Hardware accelerated path tracing for real time applications : Bachelor thesis. Barcelona : Polytechnic University of Catalonia, 2025. URL: <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/7534d9b0-dd2e-4038-b718-4cd2ac92b473> (date of access: 21.05.2026).
8. Recent advances in light transport simulation: some theory and a lot of practice / J. Krivánek et al. SIGGRAPH '14. 2014. Art. 17. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1145/2614028.2615438>.

Історія статті:

Отримано: 02.05.2026 Доопрацьовано: 10.05.2026 Прийнято до друку: 23.05.2026 Опубліковано: 29.05.2026