

## **РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ РЕНДЕРИНГУ У СУЧАСНИХ ГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСОРАХ**

Вінницький національний технічний університет

### **Анотація**

*Проаналізовано сучасні методи рендерингу, що реалізуються у графічних процесорах для візуалізації тривимірних сцен у режимі реального часу. Розглянуто класичні та сучасні підходи до формування зображення, зокрема растеризацію, трасування променів та гібридні методи рендерингу, які поєднують переваги обох підходів. Значну увагу приділено особливостям реалізації моделей освітлення, зокрема методу Фонга, як базового інструменту локального затінення у графічних конвеєрах. Проаналізовано роль апаратних засобів сучасних відеокарт, включаючи паралельну обробку даних, використання спеціалізованих обчислювальних блоків та оптимізацій на рівні пам'яті й шейдерних програм. Отримані результати дозволяють оцінити тенденції розвитку графічних процесорів і визначити перспективні напрями вдосконалення методів рендерингу для високореалістичної комп'ютерної графіки.*

**Ключові слова:** рендеринг, графічний процесор, растеризація, трасування променів, метод Фонга, гібридний рендеринг, освітлення, комп'ютерна графіка

### **Abstract**

*An analysis of modern rendering methods implemented in graphics processors for real-time visualization of three-dimensional scenes is carried out. Classical and modern approaches to image formation are considered, in particular rasterization, ray tracing and hybrid rendering methods that combine the advantages of both approaches. Considerable attention is paid to the features of the implementation of lighting models, in particular the Phong method, as a basic tool for local shading in graphics pipelines. The role of hardware of modern video cards is analyzed, including parallel data processing, the use of specialized computing units and optimizations at the memory level and shader programs. The results obtained allow us to assess the trends in the development of graphics processors and identify promising areas for improving rendering methods for highly realistic computer graphics.*

**Keywords:** rendering, graphics processor, rasterization, ray tracing, Phong method, hybrid rendering, lighting, computer graphics

### **Вступ**

Рендеринг [1-7] сучасних графічних процесорах є однією з складових комп'ютерної графіки, яка відповідає за перетворення абстрактних тривимірних сцен у двовимірні зображення, що сприймаються користувачем на екрані. За останні роки архітектура GPU та алгоритми рендерингу зазнали суттєвих змін, спрямованих на підвищення реалістичності зображення, ефективності обчислень та адаптації під рендеринг у реальному часі. Основні методи сучасного рендерингу включають класичну растеризацію, трасування променів, гібридні підходи, метод Фонга, а також численні оптимізації та допоміжні технології. У цьому дослідженні розглянуто суть і реалізацію цих методів у сучасних відеокартах, їх особливості та практичне значення.

### **Результати дослідження**

Класичний підхід до рендерингу у реальному часі базується на растеризації, алгоритмі перетворення тривимірної геометрії у відповідні пікселі екрану. Растеризація обробляє полігональні моделі шляхом проєкції трикутників сцени на площину екрана та визначення кольору кожного пікселя на основі атрибутів поверхні. Цей метод був стандартом у реальному часі завдяки високій продуктивності та здатності апаратно прискорювати етапи трансформації, освітлення та затінення. Растеризаційний конвеєр GPU складається з послідовних стадій: вершинна стадія, примітивна асемблерія, растеризація та фрагментне шейдерування. Ця система ефективно використовує

паралельні обчислення GPU, але має обмеження у точності моделювання фізичних властивостей світла, особливо при обробці складних оптичних ефектів, таких як реалістичні тіні, відбиття чи глобальне освітлення. Саме тому растеризація залишається домінуючим методом у застосунках із високою частотою кадрів, але часто інтегрується з іншими техніками для покращення якості зображення [1].

На відміну від растеризації, трасування променів базується на моделюванні поведінки світла як променів, які випромінюються з точки камери у сцену та відбиваються чи переломлюються поверхнями. Цей метод природно відтворює фізичні властивості світла і забезпечує фотореалістичну якість, але історично вимагав значних обчислювальних ресурсів, які були недоступні для рендерингу у реальному часі. Традиційно трасування променів застосовували у фільмах та офлайн-рендерингу, де час обробки одного кадру не є критичним. Однак із появою спеціалізованих апаратних блоків трасування та розвитком API, таких як DirectX Raytracing і Vulkan Ray Tracing, цей метод поступово інтегрується у сучасні GPU і стає доступним для інтерактивних застосувань, зокрема у відеоіграх нового покоління [1][2].

Основна технічна складність трасування променів полягає у великій кількості операцій перетину променя з геометрією сцени та обчисленні освітлення на кожній точці взаємодії. Для підвищення продуктивності сучасні архітектури GPU включають RT-ядра (Ray Tracing Cores) або подібні апаратні блоки, що прискорюють побудову та перетин променів із просторовими структурами даних, такими як Bounding Volume Hierarchy [2][3]. Такі спеціалізовані блоки з'явилися в нових лінійках відеокарт, що дозволяє трасувати промені з мінімальним впливом на загальну продуктивність системи й досягати реалістичних візуальних ефектів навіть при реальному часі [2].

Не зважаючи на те, що трасування променів забезпечує високу якість, чисто трасувальні конвеєри залишаються значно повільнішими за класичну растеризацію. Тому у сучасних практиках широко застосовують гібридні підходи, які поєднують растеризацію для базових елементів сцени та трасування променів для вибіркового ефектів, таких як тіні, відбиття чи глобальне освітлення. Такий гібрид дозволяє використовувати переваги обох методів: продуктивність растеризації та якість трасування променів [5].

Окрім базових методів, існує широкий спектр допоміжних алгоритмів і оптимізацій, що істотно впливають на ефективність рендерингу. Наприклад, техніка Multiple Render Targets дозволяє одночасно рендерити в кілька буферів цільових текстур, що є основою для відкладеного затінення. Ця оптимізація зменшує дублювання обчислень та підвищує ефективність освітлювальних проходів у сцені [6].

Ще одним важливим напрямом є алгоритми реалізації глобального освітлення та повторного використання вибірок, такі як ReSTIR (Spatiotemporal Reservoir Resampling). ReSTIR призначений для повторного використання вибірок освітлення у просторі та часі, зменшуючи шум та підвищуючи стабільність результату при трасуванні складних сцен з великою кількістю джерел світла [7].

У межах практичної реалізації рендерингу у GPU важливу роль відіграють методи розпаралелення та оптимізації конвеєра. Архітектури GPU проєктуються з орієнтацією на масивну паралельність обчислень, де тисячі потоків виконують однотипні інструкції над різними фрагментами даних. Розробники алгоритмів рендерингу використовують цю властивість шляхом розбиття задачі на підзадачі, які можуть бути виконані одночасно: наприклад, розподіл за об'єктами, за частинами сцени або за фрагментами зображення, що дозволяє рівномірно завантажувати обчислювальні блоки GPU та підвищувати частоту кадрів [3][4].

Сучасні GPU включають елементи апаратного прискорення для специфічних задач, таких як трасування променів, прискорене пошукування перетинів та обробка складних шейдерів. Це дозволяє реалізовувати алгоритми, які раніше були доступні лише в офлайн-рендері, без значного падіння продуктивності у реальному часі. Серед таких прикладів — спеціалізовані блоки для побудови ієрархічних структур простору, оптимізовані обчислення BVH та апаратні механізми для динамічного адаптування навантаження між різними обчислювальними одиницями [2][3].

Одним із основних методів обчислення освітлення на поверхні у сучасних рендерингових пайплайнах є метод Фонга, який використовується для моделювання відбиття світла від гладких поверхонь. Метод Фонга включає три основні компоненти: амб'єнтне, дифузне та дзеркальне освітлення. Амб'єнтне освітлення забезпечує базове рівномірне підсвічування об'єкта, яке не залежить від положення джерела світла. Дифузна складова моделює розсіяння світла на шорстких поверхнях і розраховується залежно від кута між нормаллю поверхні та напрямком на джерело

світла. Дзеркальна складова моделює відбиття світла на гладких поверхнях, яке залежить від кута між напрямком відбитого променя та напрямком на камеру [1].

Метод Фонга широко застосовується як у растеризації, так і у гібридних рендерингових пайплайнах, де окремі ефекти освітлення можуть обчислюватися через трасування променів, а базове освітлення виконується класично. Дифузне та дзеркальне освітлення часто інтегрують з глобальними ефектами освітлення або SSAO для підвищення реалістичності сцени [5].

Метод Фонга також є основою для побудови ефектів спекулярного блиску та реалістичних відбиттів, які у традиційній растеризації обчислюються без трасування променів. У сучасних GPU ці ефекти часто комбінують із бамп-мапінгом та нормал-мапінгом для досягнення високої деталізації поверхні. Апаратна підтримка паралельних обчислень дозволяє одночасно обчислювати амбієнтну, дифузну та дзеркальну компоненти для кожного пікселя, що значно підвищує продуктивність і дозволяє використовувати метод Фонга у високодеталізованих сценах [3][4].

Поєднання методу Фонга з трасуванням променів дає змогу обчислювати не тільки локальне освітлення, але й точні тіні, відбиття та прозорості поверхні, що значно підвищує реалістичність сцени. У гібридних пайплайнах метод Фонга обчислює базове освітлення для всіх фрагментів, тоді як RT-блоки GPU додають ефекти глобального освітлення. Це дозволяє досягати високої якості зображення без значного зниження частоти кадрів [7].

Серед допоміжних технік, що підвищують якість візуалізації, застосовуються просторові та часові фільтри, що зменшують шум трасованих ефектів та стабілізують зображення при зміні кадрів. Часові фільтри використовують дані з попередніх кадрів для підвищення якості поточного зображення, а адаптивні просторові фільтри враховують локальні варіації освітлення та геометрії [7].

Сучасні GPU також підтримують текстурні оптимізації, такі як мегатекстури та адаптивна потокова передача текстур, що дозволяють зберігати великі обсяги текстурних даних у зовнішній пам'яті та динамічно підвантажувати необхідні частини у відеопам'ять відповідно до потреб сцени. Такі методи зменшують навантаження на пам'ять та дозволяють працювати з детальними сценами без втрат продуктивності [3].

На рисунку 1 зображено узагальнену структуру рендерингу, характерну для сучасних графічних систем і відео карт.



Рис. 1. Структуру рендерингу

У центральній частині схеми окремо виділено метод Фонга як класичну модель освітлення, що широко використовується у растеризаційних конвеєрах. Від нього відходять три складові: амбієнтне освітлення, яке задає базовий рівень яскравості сцени; дифузне освітлення, що описує розсіювання світла від матових поверхонь; дзеркальне освітлення, яке моделює відблиски на блискучих матеріалах. Разом ці компоненти формують підсумковий колір фрагмента.

Нижня частина схеми відображає допоміжні та апаратні аспекти рендерингу. З одного боку показано блок оптимізацій і технік, до яких належать використання кількох цільових буферів рендерингу (MRT), методи екранного глобального освітлення та стохастичного вибіркового трасування, а також різні текстурні оптимізації. З іншого боку виділено апаратне прискорення, представлене спеціалізованими RT-ядрами та структурами ієрархічного поділу простору, які

використовуються для прискорення обчислень перетинів і підвищення загальної ефективності рендерингу.

Таким чином, сучасні методи рендерингу у відеокартах є складним поєднанням класичних алгоритмів, сучасних трасуючих технік, методу Фонга, адаптивних фільтрів та апаратних оптимізацій. Вони дозволяють досягати високої якості зображення при обмежених апаратних ресурсах, що є необхідним для розвитку реалістичних ігрових та візуалізаційних застосунків.

### Висновки

Сучасні методи рендерингу у відеокартах є складним поєднанням класичних алгоритмів, сучасних трасуючих технік, методу Фонга, адаптивних фільтрів та апаратних оптимізацій. Вони дозволяють досягати високої якості зображення при обмежених апаратних ресурсах, що є необхідним для розвитку реалістичних ігрових та візуалізаційних застосунків [1][2][3][5][7].

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yu Zh. Ray tracing in computer graphics // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2025. P. 1–12.
2. Wang M., Yu Z. RayBench: An advanced NVIDIA-centric GPU rendering benchmark suite // Electronics. 2023. Vol. 12, no. 18. P. 1–20.
3. Романюк О. Н., Майданюк В. П., Новосельцев О. О. Класифікація методів рельєфного текстуровання для високореалістичного рендерингу // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2025. № 1. С. 1–10.
4. Романюк О. Н., Бобко О. Л., Снігур А. В. Метричне оцінювання розпаралелення рендерингу // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2025. № 2. С. 1–9.
5. Walewski P., Myszkowski K., Seidel H.-P. Heuristic based real-time hybrid rendering with rasterization and ray tracing // Computer Graphics and Applications. 2019. P. 1–8.
6. Multiple render targets // Wikipedia : The Free Encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple\\_Render\\_Targets](https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple_Render_Targets) (дата звернення: 05.02.2026).
7. Spatiotemporal reservoir resampling // Wikipedia : The Free Encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spatiotemporal\\_reservoir\\_resampling](https://en.wikipedia.org/wiki/Spatiotemporal_reservoir_resampling) (дата звернення: 05.02.2026).

**Романюк Олександр Никифорович** - д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: rom8591@gmail.com.

**Майданюк Володимир Павлович** - канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

**Мельник Анастасія Володимирівна** – студентка гр. 2ПІ-22Б, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**Romanyuk Oleksandr Nikiforovich**- Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rom8591@gmail.com.

**Maydanyuk Volodymyr Pavlovych** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

**Melnyk Anastasia Volodymyrivna** – student of group 2PI-22B Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.