

Євгеній Сергійович Бобришев

кандидат економічних наук, викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет "Чернігівська політехніка" (Чернігів, Україна)
Email: bobryshew@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7031-1000>

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У статті розглянуто основні методи оптимізації тривимірних моделей, що застосовуються в системах комп'ютерної графіки реального часу. Проаналізовано підходи до зменшення полігональності моделей, використання рівнів деталізації, оптимізації текстур і матеріалів з урахуванням вимог до продуктивності та візуальної якості. Особливу увагу приділено особливостям реалізації процесів оптимізації в середовищі Blender та їх ролі у підготовці моделей для інтерактивних застосунків. Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації щодо вибору методів оптимізації залежно від умов використання тривимірних моделей у реальному часі.

Ключові слова: комп'ютерна графіка; тривимірне моделювання; оптимізація моделей; реальний час; рівні деталізації; Blender.

Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Сучасні системи комп'ютерної графіки реального часу широко застосовуються в ігровій індустрії, системах віртуальної та доповненої реальності, інтерактивних симуляторах і візуалізаційних платформах. Для таких систем ключовими вимогами є висока продуктивність, стабільна частота кадрів і збереження прийнятної візуальної якості. Одним із визначальних чинників, що впливають на ефективність рендерингу в реальному часі, є складність тривимірних моделей, зокрема їхня полігональність, структура топології та характеристики текстур.

Зростання обчислювальних можливостей графічних процесорів не усуває потреби в оптимізації тривимірних моделей, оскільки сучасні сцени часто містять велику кількість об'єктів, складні матеріали та освітлення. Використання неоптимізованих моделей призводить до зниження продуктивності, збільшення часу завантаження сцен і обмежує можливості масштабування графічних застосунків. У зв'язку з цим оптимізація геометрії, текстур і рівнів деталізації є необхідною складовою процесу підготовки 3D-контенту для систем реального часу.

Особливою актуальності набуває питання оптимізації тривимірних моделей у контексті використання універсальних інструментів тривимірного моделювання, зокрема середовища Blender. Blender поєднує засоби полігонального, процедурного та скульптурного моделювання, що створює додаткові вимоги до формування ефективного пайплайну підготовки моделей для інтерактивних застосунків. У цьому контексті дослідження методів оптимізації тривимірних моделей є актуальним завданням для галузі комп'ютерних наук та комп'ютерної графіки й відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій реального часу.

Постановка проблеми. У процесі створення тривимірного контенту для систем комп'ютерної графіки реального часу розробники стикаються з проблемою забезпечення балансу між візуальною якістю моделей та продуктивністю їх рендерингу. Сучасні засоби тривимірного моделювання дозволяють створювати високодеталізовані моделі з великою кількістю полігонів, складними матеріалами та текстурами високої роздільної здатності. Однак без належної оптимізації такі моделі є непридатними для використання в інтерактивних застосунках через надмірне навантаження на графічний процесор і зниження швидкодії системи.

Особливо гостро ця проблема проявляється під час підготовки тривимірних моделей у середовищі Blender, де поєднуються різні підходи до моделювання, зокрема полігональне моделювання, скульптинг і процедурні методи. Використання скульптурних моделей із високою щільністю полігональної сітки або некоректно підготовлених текстур ускладнює їх подальше застосування в системах реального часу та потребує додаткових етапів обробки.

Відсутність системного підходу до вибору та застосування методів оптимізації тривимірних моделей призводить до неефективного використання обчислювальних ресурсів і ускладнює інтеграцію 3D-контенту в ігрові рушії, системи віртуальної реальності та інші інтерактивні платформи. Таким чином, постає проблема необхідності аналізу та систематизації методів оптимізації тривимірних моделей з урахуванням специфіки їх використання в системах комп'ютерної графіки реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика оптимізації тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу широко представлена в наукових і прикладних дослідженнях, присвячених рендерингу, ігровим рушіям та інтерактивним графічним застосункам. У фундаментальних працях з реального часу комп'ютерної графіки оптимізація геометрії розглядається як один із ключових чинників забезпечення стабільної продуктивності та ефективного використання ресурсів графічного процесора [1]. Автори наголошують, що складність полігональної сітки безпосередньо впливає на швидкість обробки вершин і загальну частоту кадрів.

Окремий напрям досліджень присвячений методам зменшення полігональності тривимірних моделей. У класичних роботах з оптимізації сіток запропоновано алгоритми спрощення геометрії, які дозволяють зменшити кількість полігонів зі збереженням основних форм об'єкта [2]. Такі методи стали основою для сучасних інструментів автоматичної оптимізації, що використовуються в системах тривимірного моделювання та ігрових рушіях.

Значна увага в наукових публікаціях приділяється використанню рівнів деталізації (Level of Detail, LOD) як ефективного засобу оптимізації сцен реального часу. Дослідження показують, що застосування декількох варіантів геометрії з різною деталізацією дозволяє суттєво знизити навантаження на графічний процесор без помітного погіршення візуальної якості сцени [1], [3]. Методи автоматичної генерації LOD активно використовуються в сучасних графічних пайплайнах.

Окрему групу робіт становлять дослідження, присвячені оптимізації текстур і матеріалів. У працях з реального часу рендерингу підкреслюється важливість використання текстурних атласів, стиснення текстур і запікання карт нормалей та навколишнього затінення для зменшення кількості обчислень під час рендерингу [1], [4]. Такі підходи дозволяють компенсувати зниження геометричної складності моделей за рахунок збереження візуальної деталізації.

У контексті практичного тривимірного моделювання значна кількість публікацій присвячена використанню середовища Blender як універсального інструмента створення та оптимізації 3D-контенту. У навчальних і прикладних виданнях Blender розглядається як ефективне середовище для підготовки моделей, орієнтованих на використання в ігрових рушіях і системах реального часу, зокрема через застосування модифікаторів, UV-розгортки та інструментів запікання текстур [5], [6].

В українських наукових і навчальних виданнях питання комп'ютерної графіки та тривимірного моделювання розглядаються переважно з позиції базових принципів побудови графічних сцен, геометричного моделювання та візуалізації [7], [8]. Водночас у цих роботах недостатньо уваги приділяється системному аналізу методів оптимізації тривимірних моделей саме для систем реального часу та інтеграції таких методів у сучасні графічні пайплайни.

Таким чином, аналіз наявних досліджень свідчить про значний обсяг робіт, присвячених окремим аспектам оптимізації тривимірних моделей. Проте питання комплексного узагальнення методів оптимізації з урахуванням специфіки їх застосування в середовищі Blender та системах комп'ютерної графіки реального часу залишається недостатньо висвітленим, що зумовлює актуальність подальших досліджень у даному напрямі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наукових публікацій, присвячених оптимізації тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу, свідчить про наявність значної кількості досліджень, орієнтованих на окремі аспекти зменшення обчислювального навантаження, зокрема оптимізацію полігональної сітки, використання рівнів деталізації та обробку текстур. Водночас більшість таких робіт розглядає зазначені методи ізольовано, без урахування їх взаємозв'язку в межах єдиного виробничого пайплайну створення 3D-контенту.

Недостатньо дослідженим залишається питання комплексного застосування методів оптимізації тривимірних моделей на етапі підготовки контенту в універсальних середовищах тривимірного моделювання, зокрема Blender. У наявних публікаціях оптимізаційні процедури часто описуються або з позиції алгоритмічної реалізації, або в контексті конкретних ігрових рушіїв, що ускладнює їх узагальнення та адаптацію до різних систем реального часу.

Крім того, у наукових роботах недостатньо уваги приділяється аналізу впливу поєднання геометричної оптимізації, текстурних методів і рівнів деталізації на загальну продуктивність та візуальну якість тривимірних сцен. Відсутність систематизованих рекомендацій щодо вибору та комбінування методів оптимізації залежно від умов використання моделей обмежує практичну цінність наявних досліджень.

Таким чином, існує потреба в узагальненні та систематизації методів оптимізації тривимірних моделей з урахуванням специфіки їх підготовки в середовищі Blender та подальшого застосування в системах комп'ютерної графіки реального часу, що визначає наукову нішу даного дослідження.

Метою дослідження є аналіз і систематизація основних методів оптимізації тривимірних моделей для використання в системах комп'ютерної графіки реального часу, а також визначення їхнього впливу на продуктивність рендерингу та візуальну якість сцен з урахуванням особливостей підготовки 3D-контенту в середовищі Blender.

Виклад основного матеріалу. Оптимізація геометрії є одним із базових і найбільш ефективних методів підвищення продуктивності систем комп'ютерної графіки реального часу. Кількість вершин і полігонів безпосередньо впливає на навантаження графічного процесора, оскільки кожен елемент геометрії проходить етапи трансформації, освітлення та растеризації під час рендерингу сцени [1]. Надмірна полігональність тривимірних моделей призводить до зниження частоти кадрів і обмежує можливості масштабування графічних застосунків.

Одним із найпоширеніших підходів до оптимізації геометрії є зменшення полігональної складності моделі зі збереженням її загальної форми. У дослідженнях з оптимізації сіток запропоновано алгоритми спрощення, що базуються на видаленні малозначущих вершин і ребер із мінімальним впливом на візуальне сприйняття об'єкта [2]. Такі методи дозволяють отримувати спрощені версії моделей, придатні для використання в реальному часі.

Важливу роль у геометричній оптимізації відіграє якість топології тривимірної моделі. Використання впорядкованої quad-топології сприяє рівномірному розподілу полігонів і покращує поведінку моделі під час деформацій та подальшої обробки. Натомість хаотична трикутна сітка або надмірна кількість дрібних полігонів у зонах з незначними змінами форми ускладнює оптимізацію та негативно впливає на продуктивність [3].

У практичному моделюванні часто застосовується скульптурний підхід, який дозволяє створювати високодеталізовані моделі з мільйонами полігонів. Проте такі моделі є непридатними для безпосереднього використання в системах реального часу. Тому обов'язковим етапом підготовки 3D-контенту є ретопологія, що полягає у створенні нової, спрощеної геометричної сітки на основі високополігонального прототипу. Цей підхід дозволяє поєднати візуальну деталізацію з прийнятною обчислювальною складністю [5]. Приклад впливу геометричної оптимізації на структуру тривимірної моделі наведено на рис. 1.

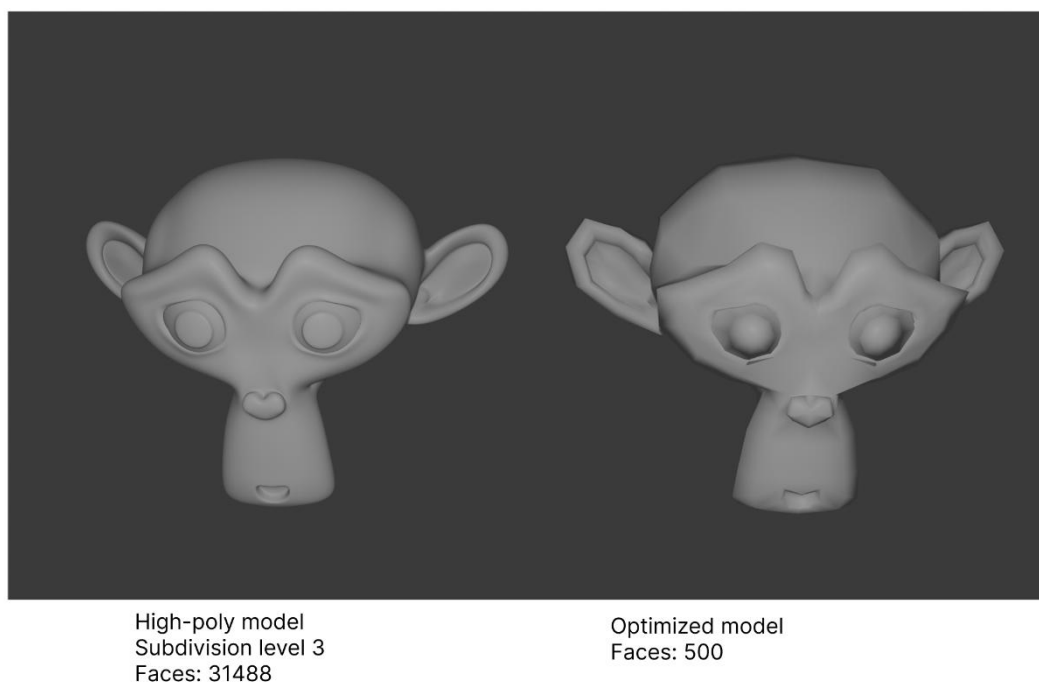


Рис. 1. Порівняння високополігональної та оптимізованої тривимірної моделі
Джерело: розроблено авторами.

У середовищі Blender геометрична оптимізація реалізується за допомогою вбудованих інструментів і модифікаторів, зокрема Decimate, який автоматично зменшує кількість полігонів, та засобів ручного редагування сітки. Використання таких інструментів дає змогу адаптувати складність моделей до вимог конкретних систем реального часу, зберігаючи контроль над якістю результату. Проте автоматичні методи оптимізації потребують обережного застосування, оскільки надмірне спрощення геометрії може призвести до втрати характерних форм і погіршення візуального сприйняття об'єкта.

Таким чином, оптимізація геометрії тривимірних моделей є критично важливим етапом підготовки 3D-контенту для систем комп'ютерної графіки реального часу. Поєднання алгоритмічних методів спрощення, ретопології та раціонального використання інструментів середовища Blender дозволяє досягти балансу між візуальною якістю моделей і продуктивністю рендерингу.

Одним із найбільш ефективних методів оптимізації тривимірних сцен для систем комп'ютерної графіки реального часу є застосування рівнів деталізації (Level of Detail, LOD). Даний підхід полягає у використанні декількох варіантів геометрії того ж самого об'єкта з різною полігональною складністю, які автоматично або динамічно підміняються залежно від відстані до камери, розміру об'єкта на екрані або інших критеріїв [1], [3].

Основна ідея LOD-підходу полягає в тому, що високодеталізована геометрія є доцільною лише тоді, коли об'єкт займає значну частину екранного простору та безпосередньо впливає на візуальне сприйняття сцени. Для віддалених об'єктів використання моделей з великою кількістю полігонів є неефективним, оскільки додаткова геометрична деталізація не сприймається користувачем, але створює зайве навантаження на графічний процесор. Застосування LOD дозволяє істотно зменшити кількість обчислень без помітної втрати якості зображення.

У наукових дослідженнях виділяють **дискретні** та **неперервні** методи реалізації рівнів деталізації. Дискретний підхід передбачає створення фіксованої кількості версій моделі, наприклад, LOD0, LOD1 і LOD2, кожна з яких має заздалегідь визначену полігональну

складність [3]. Неперервні методи, зокрема прогресивні сітки, дозволяють плавно змінювати рівень деталізації геометрії, що зменшує візуальні артефакти під час перемикання між рівнями, але потребує складніших алгоритмічних рішень [2]. Застосування рівнів деталізації для зменшення обчислювального навантаження проілюстровано на рис. 2.

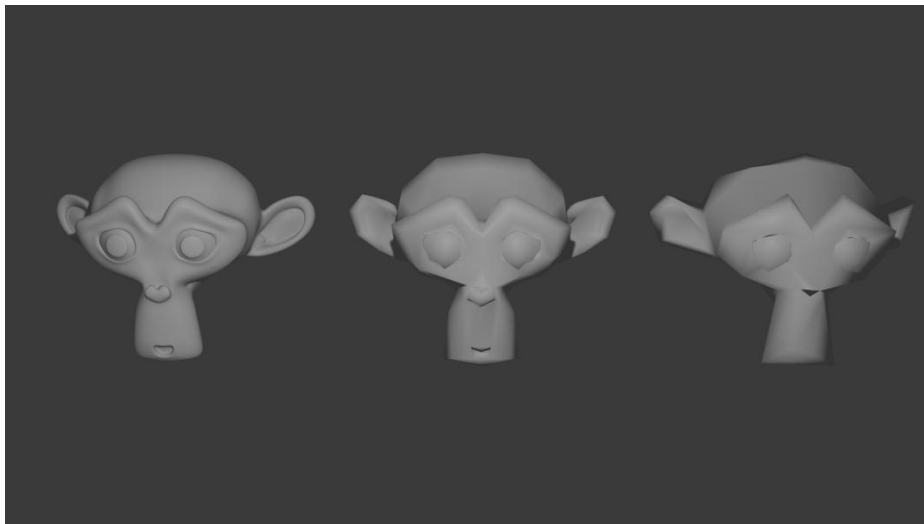


Рис. 2. Приклад використання рівнів деталізації тривимірної моделі
Джерело: розроблено авторами.

Практичне застосування LOD-технологій широко поширене в ігрових рушіях і системах інтерактивної візуалізації. Дослідження в галузі реального часу рендерингу підтверджують, що використання рівнів деталізації є одним із ключових чинників забезпечення стабільної частоти кадрів у складних сценах із великою кількістю об'єктів [1]. Особливо це актуально для відкритих сцен і віртуальних середовищ, де одночасно в полі зору користувача можуть перебувати десятки або сотні тривимірних моделей.

У середовищі Blender підтримка роботи з рівнями деталізації реалізується як на етапі моделювання, так і під час підготовки моделей до експорту в системи реального часу. Розробники можуть вручну створювати декілька варіантів геометрії на основі базової моделі або використовувати інструменти автоматичного спрощення для формування нижчих рівнів деталізації. Такий підхід дозволяє інтегрувати LOD у загальний пайплайн оптимізації та забезпечити сумісність моделей із вимогами ігрових рушіїв і VR/AR-платформ.

Отже, використання рівнів деталізації є важливим елементом оптимізації тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу. Поєднання геометричної оптимізації та LOD-технологій дозволяє значно підвищити продуктивність рендерингу при збереженні прийняттого рівня візуальної якості сцен.

Оптимізація текстур і матеріалів є не менш важливим етапом підготовки тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу, ніж оптимізація геометрії. У багатьох випадках саме текстурні операції та обчислення матеріалів створюють основне навантаження на графічний процесор, особливо під час використання складних шейдерів і високороздільних текстур [1], [4]. Надмірна кількість текстурних вибірок і великі обсяги відеопам'яті негативно впливають на продуктивність і масштабованість графічних застосунків.

Одним із ключових методів оптимізації є зменшення кількості текстур і матеріалів, що використовуються в сцені. Дослідження з реального часу рендерингу показують, що кожен додатковий матеріал збільшує кількість викликів рендерингу (draw calls), що призводить до зростання накладних витрат на обробку сцени [1]. У цьому контексті ефективним підходом є використання текстурних атласів, які дозволяють об'єднати декілька текстур в один зображувальний ресурс і зменшити кількість матеріалів, необхідних для відображення об'єктів.

Важливим аспектом оптимізації є вибір роздільної здатності текстур. Використання надмірно великих текстур не завжди призводить до помітного покращення візуальної якості, особливо для об'єктів, що перебувають на значній відстані від камери. У системах реального часу доцільним є застосування текстур з різною роздільною здатністю залежно від ролі об'єкта в сцені та його екранного розміру. Такий підхід дозволяє ефективніше використовувати відеопам'ять і зменшити час завантаження сцен [4].

Окрему роль у процесі оптимізації відіграє запікання карт (texture baking), зокрема карт нормалей, навколишнього затінення та освітлення. Запікання дозволяє перенести частину обчислень зі стадії рендерингу в реальному часі на етап попередньої підготовки контенту. У наукових і прикладних публікаціях зазначається, що використання карт нормалей є ефективним способом імітації високої геометричної деталізації на спрощених моделях, що суттєво знижує обчислювальні витрати під час рендерингу [1], [4].

У контексті фізично коректного рендерингу (Physically Based Rendering, PBR) оптимізація матеріалів полягає в раціональному використанні стандартних параметрів шейдерів і мінімізації кількості додаткових обчислень. Застосування уніфікованих PBR-матеріалів забезпечує узгодженість візуального вигляду об'єктів і полегшує інтеграцію моделей у різні графічні рушії. Водночас надмірне ускладнення шейдерних графів негативно впливає на продуктивність, що особливо критично для систем реального часу.

У середовищі Blender оптимізація текстур і матеріалів реалізується через засоби UV-розгортки, створення текстурних атласів і інструменти запікання. Використання цих можливостей дозволяє підготувати 3D-моделі, орієнтовані на ефективне використання в ігрових рушіях і системах інтерактивної візуалізації. Таким чином, оптимізація текстур і матеріалів є невід'ємною складовою комплексного підходу до підготовки тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу.

Середовище Blender є універсальним інструментом для створення та підготовки тривимірних моделей, що широко використовується в системах комп'ютерної графіки реального часу. Його особливістю є поєднання засобів полігонального моделювання, скульптингу, процедурних методів і текстурної обробки в межах єдиного робочого середовища. Це створює передумови для формування комплексного підходу до оптимізації 3D-контенту на етапі його підготовки до інтерактивного використання.

Однією з ключових особливостей Blender є можливість поетапної оптимізації моделей у межах єдиного пайплайну. На початкових етапах створення моделі допускається використання високої полігональної складності для досягнення необхідного рівня деталізації, зокрема під час скульптингу. Подальші етапи включають ретопологію, спрощення геометрії та підготовку низькополігональних версій моделей, орієнтованих на використання в системах реального часу [5], [6]. Такий підхід дозволяє зберегти візуальну якість об'єктів при зменшенні обчислювального навантаження.

Blender надає широкий набір модифікаторів, які можуть використовуватися для оптимізації геометрії без руйнування вихідної сітки. Застосування модифікаторів спрощення, дзеркального відображення та інстансування дозволяє зменшити кількість унікальних елементів геометрії та оптимізувати структуру моделей. Важливою перевагою є можливість контролювати ступінь оптимізації та адаптувати її до вимог конкретного проєкту.

Особливу роль у підготовці моделей для реального часу відіграє UV-розгортка та текстурний пайплайн. У Blender реалізовано інструменти, що дозволяють ефективно організувати UV-простір, мінімізувати кількість текстур і підготувати текстурні атласи. У поєднанні з інструментами запікання це забезпечує можливість перенесення високої деталізації з високополігональних моделей на оптимізовані версії, придатні для інтерактивного рендерингу [4], [6].

Важливою особливістю Blender є його орієнтація на сумісність із системами реального часу. Підтримка стандартних форматів експорту та відповідність сучасним графічним пайплайнам дозволяють інтегрувати оптимізовані моделі в ігрові рушії та VR/AR-платформи без додаткової обробки. Це робить Blender ефективним інструментом не лише для створення 3D-контенту, але й для його підготовки з урахуванням обмежень реального часу.

Узагальнений пайплайн оптимізації тривимірних моделей у середовищі Blender наведено на рис. 3.

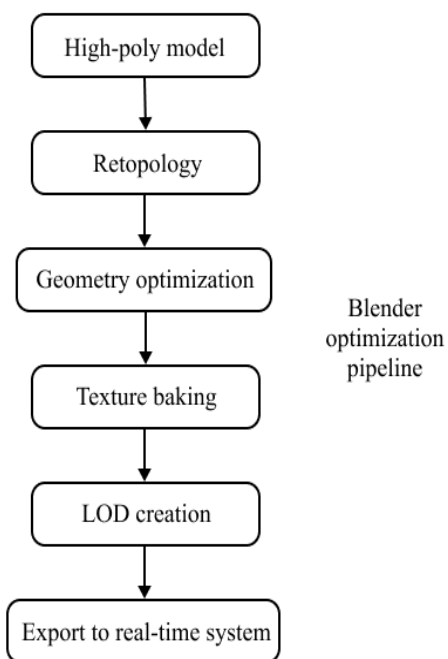


Рис. 3. Пайплайн оптимізації тривимірних моделей у середовищі Blender
Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, середовище Blender забезпечує комплексний набір засобів для оптимізації тривимірних моделей, що дозволяє реалізувати поетапний і керований процес підготовки 3D-контенту для систем комп’ютерної графіки реального часу. Рациональне використання інструментів Blender у поєднанні з методами геометричної та текстурної оптимізації сприяє підвищенню продуктивності графічних застосунків без суттєвого погіршення візуальної якості.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, доцільно систематизувати критерії вибору методів оптимізації тривимірних моделей залежно від типу сцени, умов відображення та технічних обмежень цільової платформи. Структуроване представлення таких критеріїв дозволяє підвищити практичну цінність дослідження та спростити прийняття рішень під час підготовки 3D-контенту для систем реального часу. Узагальнені рекомендації щодо вибору методів оптимізації наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Узагальнення критеріїв вибору методів оптимізації тривимірних моделей

Умови використання	Обмеження	Рекомендовані методи оптимізації	Коментар
1	2	3	4
Близька дистанція огляду (LOD0)	Високі вимоги до деталізації	Ретопологія, оптимальна quad-топологія, baking normal maps	Збереження форми при зменшенні полігонів
Середня дистанція (LOD1)	Обмеження GPU	Polygon reduction, LOD	Баланс якості та продуктивності

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Далека дистанція (LOD2–LOD3)	Мінімальне навантаження	Aggressive decimation, impostors	Деталі непомітні
Мобільні платформи	Обмежена відеопам'ять	Texture atlases, low-res textures, мінімум матеріалів	Зменшення draw calls
VR/AR	Висока частота кадрів	Оптимізація геометрії + LOD + baking	Критично для FPS
Великі відкриті сцени	Багато об'єктів	Instancing, LOD, occlusion culling	Масштабування сцени
Архітектурна візуалізація	Висока точність форми	Раціональна топологія, selective subdivision	Локальна деталізація

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. У статті проаналізовано та систематизовано основні методи оптимізації тривимірних моделей для використання в системах комп'ютерної графіки реального часу. Результати дослідження свідчать про досягнення поставленої мети та підтверджують доцільність комплексного підходу до підготовки 3D-контенту з урахуванням обмежень продуктивності та вимог до візуальної якості.

Встановлено, що оптимізація геометрії тривимірних моделей, зокрема зменшення полігональної складності, ретопологія та раціональна побудова топології, є базовим чинником підвищення ефективності рендерингу в реальному часі. Застосування рівнів деталізації дозволяє адаптувати складність моделей до умов відображення та суттєво зменшити навантаження на графічний процесор без помітного погіршення візуального сприйняття сцен.

Показано, що оптимізація текстур і матеріалів, включаючи використання текстурних атласів, зменшення роздільної здатності текстур і записання карт, є ефективним засобом компенсації зниження геометричної деталізації та сприяє зменшенню кількості обчислень під час рендерингу. Поєднання геометричних і текстурних методів оптимізації дозволяє досягти балансу між продуктивністю та якістю зображення.

Обґрунтовано, що середовище Blender забезпечує комплексний набір інструментів для реалізації поетапного процесу оптимізації тривимірних моделей, орієнтованого на використання в системах комп'ютерної графіки реального часу. Раціональне використання можливостей Blender у межах єдиного пайплайну підготовки 3D-контенту сприяє ефективній інтеграції моделей у інтерактивні застосунки та графічні рушії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання узагальнених критеріїв вибору методів оптимізації (табл. 1) під час підготовки тривимірних моделей для систем реального часу. Перспективами подальших досліджень є аналіз автоматизованих методів оптимізації та оцінювання впливу процедурних підходів на продуктивність і якість тривимірних сцен у реальному часі.

Заява про використання генеративного штучного інтелекту та технологій на основі штучного інтелекту

Під час підготовки даної наукової статті генеративні технології штучного інтелекту використовувалися як допоміжний інструмент для мовного редагування тексту та вдосконалення його стилістичного оформлення. Формування наукової проблеми, аналіз літературних джерел, узагальнення результатів дослідження, інтерпретація отриманих висновків та підготовка ілюстративних матеріалів здійснювалися автором самостійно. Автор несе повну відповідальність за достовірність наведених даних, коректність посилань і дотримання принципів академічної доброчесності.

Список використаних джерел

1. Akenine-Möller, T., Haines, E., & Hoffman, N. (2018). *Real-time rendering* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315365459>.
2. Hoppe, H. (1996). Progressive meshes. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (pp. 99–108). <https://doi.org/10.1145/237170.237216>.
3. Luebke, D., Reddy, M., Cohen, J. D., Varshney, A., Watson, B., & Huebner, R. (2003). *Level of detail for 3D graphics*. Morgan Kaufmann.
4. Lengyel, E. (2012). *Mathematics for 3D game programming and computer graphics* (3rd ed.). CRC Press.
5. Mullen, T. (2011). *Introducing character animation with Blender*. Wiley Publishing.
6. Roosendaal, T., & Wartmann, F. (2014). *The official Blender guide*. Blender Foundation.
7. Бондаренко, В. П. (2016). *Комп'ютерна графіка*. Видавнича група BHV.
8. Морзе, Н. В., & Барна, О. В. (2010). *Основи комп'ютерної графіки*. Генеза.

References

1. Akenine-Möller, T., Haines, E., & Hoffman, N. (2018). *Real-time rendering* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315365459>.
2. Hoppe, H. (1996). Progressive meshes. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (pp. 99–108). <https://doi.org/10.1145/237170.237216>.
3. Luebke, D., Reddy, M., Cohen, J. D., Varshney, A., Watson, B., & Huebner, R. (2003). *Level of detail for 3D graphics*. Morgan Kaufmann.
4. Lengyel, E. (2012). *Mathematics for 3D game programming and computer graphics* (3rd ed.). CRC Press.
5. Mullen, T. (2011). *Introducing character animation with Blender*. Wiley Publishing.
6. Roosendaal, T., & Wartmann, F. (2014). *The official Blender guide*. Blender Foundation.
7. Bondarenko, V. P. (2016). *Kompiuterna hrafika [Computer graphics]*. BHV Publishing Group.
8. Morze, N. V., & Barna, O. V. (2010). *Osnovy kompiuternoї hrafiky [Fundamentals of computer graphics]*. Heneza.

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.01.2026

UDC 004.92

Bobryshev Yevhenii

PhD in economics, Associate Professor of the Department of Informational and computer systems
Chernihiv Polytechnic National University of Ukraine (Chernihiv, Ukraine)
Email: bobryshev@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7031-1000>

METHODS OF 3D MODEL OPTIMIZATION FOR REAL-TIME APPLICATIONS

The development of real-time computer graphics systems has increased the demand for optimized three-dimensional models suitable for interactive applications. Video games, virtual and augmented reality platforms, and real-time simulators require stable performance and high visual quality under hardware limitations. The complexity of 3D models, including polygon density, topology structure, texture resolution, and material configuration, directly affects rendering performance.

The purpose of this study is to analyze and systematize the main methods of 3D model optimization for real-time computer graphics systems. The research is based on the analysis of scientific sources in real-time rendering and practical approaches to 3D modeling. Particular attention is given to geometric simplification, Level of Detail (LOD) techniques, and texture optimization methods.

The results show that polygon reduction, retopology, and rational topology design significantly improve rendering efficiency. The use of LOD allows dynamic adaptation of model complexity according to viewing distance, reducing computational costs while maintaining acceptable visual quality. Texture optimization, including texture atlases and baking techniques, further decreases GPU workload.

The study confirms that a systematic combination of geometric and texture optimization methods is essential for achieving a balance between performance and visual quality in real-time computer graphics systems. The proposed approach can be applied in the preparation of 3D assets for game engines and interactive applications.

Keywords: computer graphics; real-time rendering; 3D modeling; model optimization; level of detail; Blender.

Fig.: 4. **References:** 8.