

ISSN 1996-1588

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВІ ПРАЦІ

**ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**Серія: Інформатика, кібернетика
та обчислювальна техніка**

**Присвячується 105-річчю
ДВНЗ «Донецький національний технічний
університет»**

№1(42) 2026



Дрогобич - 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Наукові праці
Донецького національного технічного
університету

**Серія: “Інформатика, кібернетика
та обчислювальна техніка”**

Всеукраїнський науковий збірник

Заснований у травні 1996 року

Виходить 2 рази на рік

№ 1 (42) ’ 2026

Дрогобич – 2026

УДК 004+519.6+519.7

Публікується згідно з рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 4 від 16.04.2026).

Збірник містить наукові статті співробітників ДонНТУ та інших навчальних і наукових закладів України, які є науковими партнерами ДонНТУ. Публікації висвітлюють результати наукових досліджень і розробок в таких напрямках, як інформатика, чисельні методи, паралельні обчислення, програмування, розробка засобів обчислювальної техніки, дослідження комп'ютерних мереж, машинна графіка і обробка зображень, математичне моделювання в різних галузях. Матеріали збірника призначені для наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів.

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Д-р техн. наук, проф. Є.О. Башков (головний редактор); д-р техн. наук, проф. Я.Ю. Дорогий, (заступник головного редактора); член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, проф. В.П. Боюн; д-р техн. наук, проф. О.А. Дмитрієва, д-р техн. наук, проф. О.О. Баркалов; д-р техн. наук, проф. О.В. Вовна; д-р техн. наук, проф. С.Д. Погорілий; д-р техн. наук, проф. О.Н. Романюк; д-р техн. наук, проф. В.А. Святний; д-р техн. наук, проф. Г.Г. Швачич; д-р техн. наук, проф. І.С. Лактіонов; канд. техн. наук, доц. І.Я. Зеленцова; канд. техн. наук, доц. Н.О. Маслова; канд. техн. наук, доц. І.А. Назарова (відп. секретар випуску), Є.О. Єжова (технічний редактор).

Адреса редакції:

Юридична адреса: пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька область, 85300
Фактична адреса: вул. Самбірська, 76, м. Дрогобич, Львівська обл., 82111
Адреса для листування: вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100
E-mail: yevhen.bashkov@donntu.edu.ua

Збірник зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія КВ, №7374 від 03.06.2003.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії за спеціальностями 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія (наказ Міністерства освіти і науки України №409 від 17 березня 2020 р.)

Збірник "Наукові праці ДонНТУ, серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка" за наказом № 409 МОНУ від 17. 03.2020 отримав категорію Б.

ЗМІСТ

I. A. Nazarova, T. V. Altukhova, M. S. Kunda Efficiency analysis of parallel implementations of one-step embedded methods for solving large-scale Cauchy problems with adaptive step size	5
М. П. Дивак, Р. В. Крепич Автономне відстеження об'єктів екологічної та енергетичної інфраструктури із використанням FPV-дрона	19
С. О. Ковальов, С. Є. Колесник Архітектура розподіленої комп'ютеризованої системи централізованого сповіщення з периферійною аудіодетекцією БПЛА в режимі Hard Real-Time	27
М. І. Литвиненко, А. В. Самокіш, В. В. Лютов, П. М. Малько Енергетичні межі ефективності LDPC та згорткових кодів як основа адаптивного зв'язку БПЛА в умовах РЕБ	35
В. П. Майданюк, О. Н. Романюк, І. Р. Арсенюк, О. О. Складанюк, М. Л. Нечипорук Приховування рентгенівських зображень у рентгенівських зображеннях із використанням стеганографічних перетворень	43
А. В. Пукас, Я. А. Цапів Автоматизована безмаркерна система вимірювання діапазонів рухів суглобів на основі трикамерного відеоаналізу	54
І. Я. Зеленьова, Т. В. Голуб, С. С. Грушко, Д. С. Котелевський Верифікація VHDL-коду за допомогою великих мовних моделей: порівняльний аналіз та програмна реалізація	65
О. В. Самощенко, С. Ю. Червонюк Формування порядку добутку при множенні чисел з рухомою комою зі зміщеним кодуванням з від'ємним нулем	73
І. С. Лактіонов, С. Ю. Семенов Результати досліджень механізмів системної інтеграції та кросрівневої взаємодії програмно-алгоритмічних компонент прогнозування врожайності агрокультур	82
О. В. Вовна, А. С. Марина, А. М. Горкавенко, І. Г. Олішевський ML-pipeline для автоматичної класифікації мікроорганізмів на основі морфометричних ознак	92
О. О. Дудник, О. Н. Романюк Software supply chain security: концепції, моделі та виклики сучасності	102
О. В. Шитікова, Г. В. Табунщик, В. А. Лавренко Модельно-орієнтований фреймворк адаптивно-предикативного обслуговування складних технічних систем	109
О. Л. Бобко, О. Н. Романюк Метод збалансованого завантаження рендерів при формуванні тривимірних графічних сцен	119

К. М. Касьян, М. А. Корпань

Комп'ютерна система графічної візуалізації великих масивів геопросторових даних у браузерному середовищі за допомогою Tiles-архітектури та WebGPU 127

A. V. Myrhorodskiy, O. V. Romaniuk

Metric-Based Evaluation of Adaptive Consistency Benefits in Distributed Database Management Systems 137

I. P. Опірський, Т. І. Коробейнікова, Д. В. Бороденко, О. Я. Стахов

Метод інтелектуальної графової кореляції даних для виявлення векторів атак під час CTF-змагань 145

УДК 004.94

О. Н. Романюк, д-р техн. наук, професор

О. Л. Бобко, аспірант

^{1,2}Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна¹rom8591@gmail.com²oleksii.bobko@gmail.com

Метод збалансованого завантаження рендерів при формуванні тривимірних графічних сцен

У статті розглянуто питання балансування навантаження в процесі рендерингу тривимірних графічних сцен. Показано, що традиційні статичні та реактивні підходи не забезпечують достатньої ефективності в умовах неоднорідного розподілу обчислювальної складності кадру. Запропоновано метод прогностично-адаптивного розподілу тайлів між рендер-вузлами, який ґрунтується на багатокритеріальному оцінюванні складності тайлів. Метод може бути використаний у системах тайлового, кластерного та multi-GPU рендерингу.

Ключові слова: рендеринг, балансування навантаження, тайловий рендеринг, паралельний рендеринг, GPU

DOI: 10.31474/1996-1588-2026-1-42-119-126

Вступ

Формування тривимірних зображень є надзвичайно трудомістким обчислювальним процесом, оскільки під час рендерингу для кожного елемента зображення необхідно визначати його просторові, колірні та інші атрибути на основі значної кількості геометричних, світлотехнічних і шейдерних обчислень. При цьому використовуються складні з математичної точки зору моделі перетворення координат, визначення видимості, освітлення, текстуровання та фрагментної обробки. Найбільший внесок у загальну трудомісткість, як правило, забезпечує саме фрагментна стадія, оскільки її навантаження прямо залежить від роздільної здатності екрана та рівня повторного оброблення фрагментів [1].

Зазначене зумовлює необхідність розпаралелення обчислювального процесу між виконавцями рендерингу. При цьому однією з умов підвищення продуктивності є збалансований розподіл навантаження рендерів. Нерівномірний розподіл обчислювальної роботи призводить до ситуації, за якої частина виконавців завершує обробку раніше та простоє, тоді як інші залишаються перевантаженими. У результаті зростає загальний час формування кадру, знижується ефективність використання обчислювальних ресурсів і погіршується масштабованість системи.

Важливість цієї задачі додатково посилюється поширенням технологій фотореалістичного рендерингу, зокрема трасування променів, яке істотно збільшує вимоги до обчислювальних ресурсів графічних систем і

підсилює нерівномірність навантаження в межах кадру [2]. У сучасних сценах окремі ділянки зображення можуть істотно відрізнятися за кількістю геометричних примітивів, глибиною перекриття, складністю шейдерної обробки, наявністю прозорості, тіней, відбиттів та інших дорогих ефектів. За таких умов просторово рівномірний поділ зображення не гарантує рівномірного розподілу обчислювальної роботи.

У сучасних графічних системах для підвищення продуктивності застосовуються різні підходи до паралельного рендерингу, зокрема розподіл сцен, розподіл зображення, функціональний поділ етапів графічного конвеєра, а також їхні комбіновані варіанти. Одним із найбільш придатних до практичної реалізації є тайловий підхід, за якого кадр поділяється на окремі прямокутні ділянки, а їх обробка розподіляється між виконавцями рендерингу. Проте традиційні схеми тайлового рендерингу часто базуються на рівномірному поділі екранного простору або на статичному призначенні тайлів, що не враховує фактичної вартості їх обробки.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення продуктивності систем рендерингу складних тривимірних сцен шляхом удосконалення методів розподілу обчислювального навантаження між виконавцями рендерингу. Метою статті є розроблення методу балансування навантаження в процесі рендерингу, який забезпечує більш рівномірний розподіл обчислювальної роботи між рендер-вузлами за рахунок прогностично-адаптивного призначення тайлів кадру з урахуванням їх прогнозованої складності. Об'єктом дослідження є процес формування графічних зображень у системах

паралельного рендерингу. Предметом дослідження є методи та засоби балансування навантаження між виконавцями рендерингу під час обробки тайлів кадру.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Задача балансування навантаження в процесі рендерингу є однією з центральних у галузі високопродуктивної комп'ютерної графіки. У працях, присвячених паралельному рендерингу, усталеною є класифікація підходів за етапом, на якому виконується розподіл графічних даних або навантаження, зокрема виділяють схеми попереднім та проміжковим просторовим розподілом зображення, а також схема з підсумковою композицією часткових зображень [3]. У цих схемах балансування може реалізовуватися як на рівні просторового розбиття зображення, так і на рівні розподілу геометрії, проміжних примітивів або готових зображень між обчислювальними ресурсами.

У підходах з попереднім просторовим розподілом кадр поділяється на просторові області, які призначаються окремим виконавцям рендерингу. Перевагою такого підходу є природна локалізація роботи в межах ділянок екранного простору, що робить його зручним для тайлового рендерингу. Водночас ефективність таких методів істотно залежить від того, наскільки рівномірно розподілена обчислювальна складність по площині кадру. Якщо різні області зображення мають істотно відмінну кількість примітивів, різний рівень повторної обробки фрагментів або неоднакову шейдерну складність, то навіть геометрично рівномірний поділ екрана не забезпечує збалансованого завантаження [4].

У методах з підсумковою композицією часткових зображень сцена або її частини рендеряться незалежно на різних виконавцях, після чого здійснюється композиція часткових зображень. Такі схеми широко застосовуються в системах візуалізації великих обсягів даних та в кластерному рендерингу. Перевагою підсумкової композиції є висока ефективність роботи з великими наборами геометрії, однак ефективність такої схеми залежить не лише від балансу навантаження під час рендерингу, а й від вартості подальшої композиції зображень та обміну даними між вузлами [5].

Значну увагу приділено також статичним і динамічним методам балансування навантаження. Статичні методи характеризуються простотою реалізації, однак не забезпечують достатньої адаптивності до неоднорідних і динамічних сцен. Динамічні методи дозволяють коригувати розподіл роботи під час виконання або між послідовними кадрами, але супроводжуються накладними витратами на диспетчеризацію, синхронізацію та перепризначення задач [4].

У сучасних дослідженнях розглядаються також багатопрістроєві схеми, зокрема динамічне балансування задач у екранному просторі у multi-GPU середовищах [6]. Важливим напрямом є оцінювання вартості рендерингу, де показано, що для ефективного балансування недостатньо враховувати лише площу просторового фрагмента кадру або кількість примітивів, оскільки реальна вартість рендерингу визначається сукупністю факторів: повторної обробки фрагментів, трудомісткості виконання шейдерів, характером доступу до пам'яті та часовою змінністю сцени [7].

У роботі [8] розглянуто питання організації розподіленого рендерингу в умовах динамічних графічних сцен і підкреслено, що традиційні статичні підходи до розподілу задач не забезпечують бажаної ефективності та стабільності. У публікації [9] проаналізовано основні способи розпаралелення рендерингу та визначено комплекс показників для оцінювання якості паралельного виконання. Це підтверджує доцільність переходу від простого геометричного поділу кадру до кількісно обґрунтованого оцінювання складності рендерингових задач.

Отже, аналіз сучасних досліджень показує, що в наявних роботах достатньо ґрунтовно розглянуто загальні підходи до паралельного рендерингу, динамічне балансування навантаження в кластерних і multi-GPU системах, а також інфраструктурні засоби підтримки схем з попереднім та проміжним просторовим розподілом зображення. Разом із тим залишається недостатньо опрацьованим питання балансування навантаження саме в процесі тайлового рендерингу на основі багатокритеріального прогнозування складності тайлів. Недостатньо дослідженим є поєднання в межах одного методу таких характеристик, як геометрична складність ділянки кадру, глибина перекриття, шейдерна складність, наявність прозорості, додаткових візуальних ефектів і історія виконання відповідних областей у попередніх кадрах.

Мета і задачі дослідження

Метою статті є розроблення методу балансування навантаження в процесі рендерингу, який забезпечує більш рівномірний розподіл обчислювальної роботи між рендер-вузлами за рахунок урахування прогнозованої складності тайлів кадру.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі задачі дослідження:

- 1) проаналізувати фактори, що визначають нерівномірність навантаження при рендерингу;
- 2) формалізувати задачу розподілу тайлів між рендер-вузлами;
- 3) розробити метод багатокритеріального оцінювання складності

тайлів;

4) запропонувати алгоритм прогностично-адаптивного призначення тайлів виконавцям;

5) виконати порівняльний аналіз запропонованого підходу з існуючими методами балансування навантаження під час рендерингу.

Метод прогностично-адаптивного балансування навантаження

Нехай кадр поділяється на множину тайлів:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\},$$

а множина виконавців рендерингу подається як:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}.$$

Під рендер-вузлом розуміється фізичний або логічний виконавець, якому може бути призначено один чи кілька тайлів кадру. Кожен тайл t_i характеризується обчислювальною вартістю $W(t_i)$, а кожен рендер-вузол p_j продуктивністю S_j . Якщо множина тайлів, призначених вузлу p_j , позначається через P_j , тоді сумарне навантаження цього вузла можна визначити як:

$$L_j = \sum_{t_i \in P_j} W(t_i).$$

Тривалість завершення роботи вузла з урахуванням його продуктивності задається співвідношенням:

$$T = \frac{L_j}{S_j}.$$

Задача балансування навантаження полягає у визначенні такого відображення

$$A: T \rightarrow P,$$

за якого максимальний час завершення обробки серед усіх вузлів мінімізується:

$$\min \max_{j=1..m} \frac{L_j}{S_j}.$$

Задача балансування не зводиться до простого рівномірного поділу кадру на однакові ділянки. Вона полягає у розподілі тайлів відповідно до їхньої реальної або прогнозованої вартості. Доцільність використання формалізованих показників для оцінювання якості розпаралелення підтверджується результатами роботи [9], у якій розглянуто метричне оцінювання розпаралелення рендерингу та показано важливість кількісного аналізу ефективності розподілу обчислень між виконавцями.

Запропоновано метод, який полягає у переході від просторово рівномірного розподілу кадру до розподілу, оснований на прогнозованій обчислювальній вартості окремих тайлів. Для цього кожен тайл оцінюється за сукупністю характеристик, що відображають його геометричну, растрову та шейдерну складність, а також історію обробки у попередніх кадрах. Після цього тайли призначаються рендер-вузлам таким

чином, щоб сумарне нормоване навантаження було максимально вирівняним.

Інтегральну оцінку складності тайла пропонується визначати за формулою:

$$W(t_i) = \alpha G_i + \beta O_i + \gamma S_i + \delta T_i + \mu R_i + \nu H_i$$

де G_i – геометрична складність тайла; O_j – показник глибини перекриття; S_i – складність фрагментного шейдера; T_i – коефіцієнт прозорості; R_i – ознака наявності дорогих ефектів, таких як тіні, відбиття чи трасування променів; H_i – історична складність тайла, отримана на основі попередніх кадрів; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu, \nu$ – вагові коефіцієнти.

Після обчислення ваг усіх тайлів формується їх упорядкована послідовність за спаданням складності:

$$W(t_1) \geq W(t_2) \geq \dots \geq W(t_n).$$

Далі кожен наступний тайл призначається тому рендер-вузлу, для якого поточне нормоване навантаження є мінімальним

$$j^* = \arg \min_j \frac{L_j}{S_j}.$$

Після цього навантаження обраного вузла оновлюється:

$$L_{j^*} = L_{j^*} + W(t_j).$$

Прогностично-адаптивний характер методу забезпечується за рахунок історичної складової H_i . Після завершення обробки кадру історична оцінка коригується на основі відомостей про складність відповідних ділянок зображення. Такий механізм дозволяє враховувати часову когерентність сцен і поступово уточнювати модель складності для наступних кадрів.

Особливість методу полягає не в самому факті використання тайлового підходу, а в поєднанні багатокритеріального оцінювання складності тайлів із механізмом історично-коригованого їх призначення виконавцям рендерингу. На відміну від методів, що переважно орієнтовані на статичне просторове розбиття або одновимірне оцінювання, запропонований метод враховує просторову й часову неоднорідність навантаження та може бути застосований як у гомогенних, так і в гетерогенних системах.

Розглянемо питання визначення параметрів складності тайлів. Геометрична складність G_i може бути оцінена як кількість трикутників або об'єктів, проєкція яких перетинає ділянку тайла.

Показник перекриття O_i доцільно визначати як відношення кількості фрагментних інвокацій до кількості пікселів тайла:

$$O_i = \frac{N_i^{frag}}{N_i^{pix}}.$$

Складність шейдерної обробки S_i може визначатися через вагові коефіцієнти матеріалів

або шейдерних програм. Коефіцієнт прозорості T_i може задаватися як частка прозорих примітивів, що потрапляють у межі тайла:

$$T_i = \frac{N_i^{transp}}{N_i^{opaque} + N_i^{transp}}$$

Показник трудомістких ефектів R_i формується на основі ознак використання тінюві карти, проходи формування відбиттів, етапи трасування променів або інших ресурсомістких операцій. Історична складність H_i визначається за даними попередніх кадрів, що дозволяє враховувати часову когерентність сцени. Такий підхід узгоджується з ідеєю використання системи метричних показників для оцінювання якості паралельного виконання рендерингу, обґрунтованою у [9].

Розглянемо етапи реалізації запропонованого методу. Спочатку поточний кадр поділяється на прямокутні тайли заданого розміру. Далі для кожного тайла визначаються його просторові межі та виконується попереднє оцінювання складності: обчислюється кількість геометричних примітивів, оцінюється рівень перекриття, визначається тип матеріалів і фрагментних шейдерів, наявність прозорих елементів та трудомістких ефектів, а також зчитуються історичні дані з попередніх кадрів. Після цього для кожного тайла обчислюється інтегральна вага $W(t_i)$.

На наступному етапі тайли впорядковуються за спаданням ваги. Починаючи з найскладніших, вони послідовно призначаються рендер-вузлам за правилом мінімального поточного нормованого навантаження.

Після завершення призначення формується новий розподіл обчислювальної роботи між виконавцями. Після обробки кадру історична інформація оновлюється, і цикл повторюється для наступної ітерації рендерингу. Схематичне зображення методу прогностично-адаптивного балансування навантаження наведено на рис. 1.

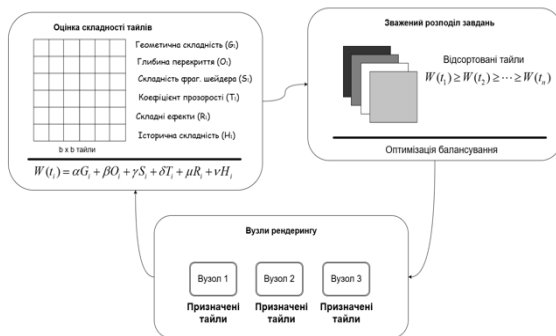


Рисунок 1 – Метод прогностично-адаптивного балансування навантаження

Оцінимо час реалізації запропонованого методу. Для графічної сцени середньої складності

при роздільній здатності 1920×1080 , кількості видимих трикутників близько 0,8 млн і тайловому поділі кадру на 135 областей розміром 128×128 пікселів орієнтовний час реалізації запропонованого методу можна оцінити як суму часу багатокритеріального оцінювання складності тайлів, їх сортування та призначення рендер-вузлам.

Якщо прийняти, що середній час обчислення параметрів одного тайла становить близько 10 мкс, то для всіх тайлів витрати на етап оцінювання складності становитимуть приблизно 1,35 мс. Час сортування 135 тайлів за спаданням ваги є порівняно малим і може бути оцінений на рівні близько 0,05 мс, тоді як час призначення тайлів чотирьом рендер-вузлам за правилом мінімального поточного нормованого навантаження становитиме орієнтовно 0,15 – 0,25 мс. Отже, сумарний час реалізації запропонованого методу для одного кадру можна оцінити в межах 1,5 – 1,8 мс. За частоти 60 кадрів за секунду, коли загальний часовий бюджет кадру становить близько 16,7 мс, такі накладні витрати відповідають приблизно 8 – 11 % часу формування кадру, що можна вважати прийнятним за умови зменшення дисбалансу навантаження та скорочення загального часу рендерингу.

Ефективність запропонованого методу доцільно оцінювати порівняно з основними класами існуючих підходів до балансування навантаження під час рендерингу, а саме зі статичним рівномірним розподілом тайлів, динамічними реактивними методами та підходами, заснованими на частковому оцінюванні вартості рендерингу. Таке порівняння дає змогу встановити місце запропонованого методу серед відомих рішень і визначити, за рахунок яких саме властивостей може бути досягнуто підвищення ефективності розподілу обчислювального навантаження.

На відміну від традиційних схем, у яких кадр поділяється на просторово рівні ділянки без урахування їхньої реальної обчислювальної вартості, запропонований метод ґрунтується на багатокритеріальному прогнозуванні складності тайлів. Це означає, що рішення про призначення тайла конкретному рендер-вузлу приймається не на основі його геометричного розміру, а з урахуванням сукупності факторів, які визначають реальну трудомісткість його обробки. Саме ця властивість є головною підставою очікувати вищу ефективність запропонованого методу в неоднорідних сценах.

Порівняно зі статичним рівномірним тайловим розподілом запропонований метод має принципову перевагу, оскільки враховує, що однакові за площею фрагменти кадру можуть істотно відрізнятися за вартістю рендерингу. У традиційних схемах статичного поділу кожному виконавцю призначається або однакова кількість

тайлів, або рівна площа зображення. Такий підхід є простим, має низькі накладні витрати і добре працює лише для сцен, у яких геометрія, шейдерна складність і повторна фрагментна обробка розподілені відносно рівномірно. Проте в реальних умовах подібна ситуація трапляється нечасто. Як правило, у межах одного кадру присутні ділянки з різною щільністю полігонів, різним ступенем перекриття фрагментів, неоднаковою кількістю прозорих об'єктів та різною складністю фрагментної обробки. Унаслідок цього один виконавець може отримати ділянку кадру з невеликою кількістю простих примітивів, тоді як іншому буде призначено тайли з високим рівнем повторної фрагментної обробки, складними матеріалами, тінями чи відбиттями. За рівномірного просторового поділу це призводить до дисбалансу навантаження. Частина виконавців завершує роботу раніше й простоє, тоді як інші залишаються перевантаженими, а загальний час завершення кадру визначається саме найповільнішим виконавцем. Запропонований метод є потенційно ефективнішим, оскільки він спрямований на вирівнювання не площі обробки, а на сумарну прогнозовану вартість тайлів, що призначаються вузлам. Отже, навіть якщо одному виконавцю буде передано менше тайлів, ніж іншому, але їхня інтегральна складність виявиться співмірною, загальний дисбаланс системи зменшиться.

Перевага запропонованого методу над статичним розподілом особливо помітна в тих випадках, коли навантаження визначається не лише кількістю геометричних примітивів, а й особливостями фрагментної стадії. У сучасних графічних системах саме фрагментна обробка часто формує найбільшу частину витрат часу, оскільки її вартість прямо пов'язана з кількістю оброблюваних пікселів, рівнем повторної обробки фрагментів, наявністю текстурних звернень, розгалужень у шейдері та складних освітлювальних моделей. Тому підхід, що враховує лише геометричний поділ простору, принципово не здатний дати точну оцінку трудомісткості тайла. Запропонований метод, навпаки, враховує ці чинники через багатокомпонентну модель ваги тайла. Це дозволяє зменшити похибку оцінювання навантаження ще до моменту розподілу тайлів між виконавцями, а отже, знизити ймовірність виникнення перекоосу навантаження в межах кадру.

Порівняно з динамічними реактивними методами балансування запропонований підхід також має важливі переваги. Реактивні методи базуються на тому, що дисбаланс виявляється вже після початку виконання задачі або в момент, коли частина виконавців завершила свою роботу раніше за інших. Після цього відбувається перерозподіл роботи: частина завдань передається від

перевантажених виконавців до вільних або менш завантажених. Така схема є більш гнучкою, ніж статичний поділ, однак вона має дві суттєві недоліки. По-перше, дисбаланс уже встигає частково проявитися, тобто система реагує на проблему постфактум. По-друге, динамічний перерозподіл неминуче супроводжується накладними витратами на керування, синхронізацію, повторне планування та, в реальних розподілених системах, на передачу даних між вузлами. У запропонованому методі збережено адаптивну складову, однак вона поєднана з прогностичним механізмом. Це означає, що розподіл роботи формується не лише за фактом завершення або незавершення певних задач, а ще до початку обробки кадру, на основі прогнозованої вартості тайлів. Таким чином, метод не просто усуває дисбаланс, а частково попереджає його виникнення. Саме ця властивість дає підстави очікувати менші накладні витрати на повторне планування і вищу стабільність часу кадру в умовах, коли між сусідніми кадрами зберігається певна часова когерентність.

Суттєвою відмінністю запропонованого методу від реактивних підходів є використання історичної складової при оцінюванні складності тайла. Якщо певна ділянка кадру в попередніх ітераціях систематично виявлялася дорогою за часом обробки, ця інформація переноситься у наступний цикл планування. Унаслідок цього при стабільній або помірно змінній сцені система поступово накопичує більш точне уявлення про розподіл навантаження. Реактивні методи, як правило, не виконують такого попереджувального прогнозування в явному вигляді, а лише змінюють розклад після того, як нерівномірність уже виникла. Отже, в умовах помірної часової змінності сцени запропонований метод має забезпечувати кращу передбачуваність і стабільність розподілу, ніж класичні реактивні схеми.

Окремого розгляду потребує порівняння із методами, заснованими на частковому оцінюванні вартості рендерингу. Такі підходи вже відходять від чисто геометричного поділу екрана і намагаються оцінити реальну обчислювальну складність окремих ділянок кадру. Однак у багатьох випадках вони використовують лише одну або обмежену кількість ознак, наприклад кількість примітивів, screen-space area, локальний час попередньої обробки або спрощену карту вартості. Подібні рішення, безумовно, є точнішими за звичайний статичний поділ, але вони не завжди здатні адекватно відобразити багатофакторну природу навантаження сучасного рендерингу. Реальна трудомісткість тайла визначається не однією характеристикою, а їх комбінацією. Наприклад, тайл може містити порівняно небагато трикутників, але бути дорогим через наявність прозорих шарів, високим рівнем повторної

обробки фрагментів або складну шейдерну програму. Або навпаки, тайл із великою кількістю геометричних елементів може мати меншу вартість за рахунок простих матеріалів та ефективного раннього відсікання. Саме тому багатокритеріальний підхід, використаний у запропонованому методі, є більш універсальним. Він дає змогу оцінювати тайл не за одним домінуючим параметром, а за інтегральною моделлю, що поєднує геометричну складність, рівень перекриття, складність шейдерної обробки, прозорість, наявність дорогих ефектів та історію виконання.

З точки зору загальної якості балансування запропонований метод очікувано має забезпечити менший коефіцієнт дисбалансу, ніж статичні схеми, менший максимальний час завершення кадру, ніж реактивні методи з великими накладними витратами, а також точніше узгодження між прогнозованим і реальним навантаженням, ніж підходи з одновимірною або спрощеною оцінкою вартості. Його перевага особливо проявлятиметься у сценах, де структура навантаження є суттєво неоднорідною, а обчислювальна складність формується не лише кількістю примітивів, а насамперед характером фрагментної обробки. У відносно рівномірних сценах вираш від застосування методу може бути меншим, оскільки навіть прості схеми поділу дають у таких випадках прийнятний результат. Разом із тим саме в складних і неоднорідних сценах, що є найбільш проблемними для паралельного рендерингу, запропонований підхід має найбільший потенціал.

Таким чином, порівняльна оцінка свідчить, що запропонований метод займає проміжне, але методично сильне положення між основними класами існуючих підходів. Від статичних методів він успадковує відносну простоту тайлової організації кадру, але усуває їхній головний недолік – орієнтацію лише на геометричний розмір ділянки. Від динамічних реактивних схем він успадковує адаптивність, але доповнює її прогностичним механізмом, що дозволяє частково попереджати дисбаланс до початку виконання. Від cost-based підходів він переймає ідею оцінювання вартості рендерингу, однак розширює її до багатокритеріальної моделі

тайла, придатної для аналізу неоднорідних растрових і гібридних сцен. Саме у поєднанні цих властивостей – багатокритеріальної оцінки, історичної корекції, урахування продуктивності виконавців і прогностично-адаптивного призначення тайлів – полягає основна очікувана перевага запропонованого методу порівняно з існуючими засобами балансування навантаження під час рендерингу.

Висновки

У статті розглянуто задачу балансування навантаження в процесі рендерингу та показано, що традиційні схеми рівномірного просторового поділу кадру не забезпечують належної ефективності в умовах неоднорідних сцен. Проведений аналіз сучасних досліджень засвідчив, що наявні підходи до паралельного рендерингу, динамічного балансування та оцінювання вартості рендерингу не повністю враховують сукупний вплив геометричної складності, повторною обробкою фрагментів, витрати на обробку шейдерів, прозорості, дорогих ефектів і часової змінності кадру.

Запропоновано метод прогностично-адаптивного балансування навантаження, який базується на багатокритеріальному оцінюванні складності тайлів та їх призначенні рендер-вузлам за критерієм мінімального поточного нормованого навантаження. На відміну від відомих підходів, метод поєднує просторові характеристики тайла з історично-коригованим прогнозуванням його вартості.

Сформульовано математичну постановку задачі балансування навантаження, визначено модель інтегральної ваги тайла, описано алгоритм реалізації методу та виконано порівняльний аналіз запропонованого підходу з існуючими методами балансування навантаження під час рендерингу. Практична цінність результатів полягає у можливості використання запропонованого методу під час розроблення систем тайлового, кластерного та multi-GPU рендерингу, а також як основи для подальшого створення програмних засобів інтелектуального розподілу обчислювального навантаження у процесі формування графічних сцен.

Література

1. GPU Cost Estimation for Load Balancing in Parallel Ray Tracing / B. Cosenza et al. *GRAPP 2013: proceedings of the 8th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, Barcelona, Spain, 21–24 Febr. 2013. P. 139–151. DOI: 10.5220/0004283401390151.
2. Романюк О. Н., Бобко О. Л., Романюк О. В. Перспективи використання технології трасування променів для створення фотореалістичних зображень у реальному часі. *Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації – 2024*: матеріали IV Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів (Одеса, 2024 р.). Одеса, 2024. С. 327–328.

3. Molnar S., Cox M., Ellsworth D., Fuchs H. A Sorting Classification of Parallel Rendering. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 1994. Vol. 14, No. 4. P. 23–32. DOI: 10.1109/38.291528.
4. Dynamic Work Packages in Parallel Rendering / S. Eilemann et al. *Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*. 2016. P. 89–98.
5. Moreland K., Wylie B., Pavlakos C. Sort-Last Parallel Rendering for Viewing Extremely Large Data Sets on Tile Displays. *Proceedings IEEE Symposium on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics*. 2001. P. 85–92. DOI: 10.1109/PVGS.2001.964408.
6. Dynamic Load Balancing for Real-Time Multiview Path Tracing on Multi-GPU Architectures / E. Leria et al. *The Visual Computer*. 2022. Vol. 38. DOI: DOI: 10.1016/j.vrih.2022.08.013.
7. Locality-Aware Parallel Tile Rendering / A. Tomás et al. *MICRO 2024: 57th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*. 2024.
8. Розподілення обчислень і балансування навантаження у високопродуктивних системах паралельного рендерингу / О. Н. Романюк та ін. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. № 3. С. 112–122. DOI: 10.31649/2307-5376-2025-3-112-122.
9. Романюк О. Н., Бобко О. Л., Снігур А. В. Метричне оцінювання розпаралелення рендерингу. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. № 2. С. 1–12. DOI: 10.31649/2307-5376-2025-2-125-136.

References

1. Cosenza, B. et al. (2013), "GPU Cost Estimation for Load Balancing in Parallel Ray Tracing", *GRAPP 2013: proceedings of the 8th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, Barcelona, Spain, pp. 139–151. DOI: 10.5220/0004283401390151.
2. Romanyuk, O. N., Bobko, O. L., Romanyuk, O. V. (2024), "Prospects for using ray tracing technology to create photo-realistic images in real time" ["Perspektyvy vykorystannia tekhnologii trasuvannia promeniv dlia stvorennia fotorealistychnykh zobrazhen u realnomu chasi"], *Kompiuterni ihry ta multymedia yak innovatsiyni pidkhid do komunikatsii – 2024: materialy IV Vseukr. nauk.-tekhn. konf.*, Odesa, pp. 327–328.
3. Molnar, S., Cox, M., Ellsworth, D., Fuchs, H. (1994), "A Sorting Classification of Parallel Rendering", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 14, No. 4, pp. 23–32. DOI: 10.1109/38.291528.
4. Eilemann, S. et al. (2016), "Dynamic Work Packages in Parallel Rendering", *Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*, pp. 89–98.
5. Moreland, K., Wylie, B., Pavlakos, C. (2001), "Sort-Last Parallel Rendering for Viewing Extremely Large Data Sets on Tile Displays", *Proceedings IEEE Symposium on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics*, pp. 85–92. DOI: 10.1109/PVGS.2001.964408.
6. Leria, E. et al. (2022), "Dynamic Load Balancing for Real-Time Multiview Path Tracing on Multi-GPU Architectures", *Visual Informatics*, Vol. 38. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.08.013.
7. Tomás, A. et al. (2024), "Locality-Aware Parallel Tile Rendering", *MICRO 2024: 57th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*.
8. Romanyuk, O. N. et al. (2025), "Computation distribution and load balancing in high-performance parallel rendering systems" ["Rozpodilennia obchyslen i balansuvannia navantazhennia u vysokoproduktyvnykh systemakh paralelnoho renderynhu"], *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, No. 3, pp. 112–122. DOI: 10.31649/2307-5376-2025-3-112-122.
9. Romanyuk, O. N., Bobko, O. L., Snihur, A. V. (2025), "Metric evaluation of rendering parallelization" ["Metrychne otsiniuvannia rozparalelennia renderynhu"], *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, No. 2, pp. 1–12. DOI: 10.31649/2307-5376-2025-2-125-136.

Надійшла до редакції 7.04.2026

O. N. ROMANYUK, O. L. BOBKO

^{1,2} Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

¹rom8591@gmail.com, ²oleksii.bobko@gmail.com

METHOD FOR BALANCED LOAD DISTRIBUTION IN RENDERING DURING THE FORMATION OF THREE-DIMENSIONAL GRAPHIC SCENES

This paper addresses the problem of load balancing in the process of rendering three-dimensional graphical scenes, which remains a critical challenge in high-performance computer graphics systems. It is shown that traditional static and reactive load distribution approaches are not sufficiently effective under conditions of heterogeneous computational complexity within a frame. In modern rendering pipelines, different regions of an image may significantly differ in geometric density, depth complexity, shader cost, transparency, and presence of computationally expensive visual effects such as reflections, shadows, and ray tracing. As a result, uniform spatial partitioning of the frame does not guarantee balanced workload distribution among rendering nodes. To overcome

these limitations, a method of predictive-adaptive tile distribution is proposed. The method is based on multi-criteria evaluation of tile complexity, which integrates geometric characteristics, fragment processing cost, shader complexity, transparency factors, expensive visual effects, and historical performance data from previous frames. Each tile is assigned an integral weight reflecting its predicted computational cost. Tiles are then sorted in descending order of complexity and distributed among rendering nodes according to the criterion of minimizing the current normalized workload. The predictive-adaptive nature of the method is ensured by incorporating a historical component that updates tile complexity estimates based on previous rendering iterations. This enables the system to exploit temporal coherence in dynamic scenes and improve the accuracy of workload prediction over time. Unlike purely reactive approaches, the proposed method prevents load imbalance before execution, reducing synchronization overhead and improving frame time stability. The method is applicable to tile-based, cluster, and multi-GPU rendering systems and can be effectively used in both homogeneous and heterogeneous computing environments. Experimental estimation shows that the computational overhead of the proposed approach is acceptable relative to the overall frame rendering time, while providing improved load balancing and resource utilization. The proposed approach demonstrates higher efficiency compared to static, reactive, and single-criterion cost-based methods, particularly in complex and highly non-uniform rendering scenarios.

Keywords: *rendering, load balancing, tile-based rendering, parallel rendering, GPU*