



**Матеріали LV науково-технічної конференції
підрозділів Вінницького національного
технічного університету
(НТКП ВНТУ–2026)**

24-27 березня 2026 року

Збірник доповідей

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Матеріали LV науково-технічної конференції
підрозділів Вінницького національного
технічного університету (НТКП ВНТУ–2026)

24-27 березня 2026 року

Збірник доповідей

Електронне наукове видання

Вінниця
ВНТУ
2026

Видається за рішенням Вченої ради Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Головний редактор: В. В. Біліченко
Відповідальний за випуск: І. Ю. Єпіфанова

Робоча група з підготовки конференції:
Голова робочої групи:
проректор з наукової роботи ВНТУ І. Ю. Єпіфанова

Члени робочої групи:

декани факультетів, директор Інституту Конфуція ВНТУ;
В. М. Шпігунов, начальник РВВ ВНТУ;
Г. М. Багдасар'ян, провідний інженер РВВ ВНТУ;
О. О. Кушнір, провідний інженер РВВ ВНТУ;
С. Г. Могила, інженер 1-ї категорії РВВ ВНТУ.

Матеріали LV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2026) : збірник доповідей [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2026. – (PDF, 3599 с.) ISBN 978-617-8163-95-2

Збірник містить тексти доповідей LV ювілейної регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників підприємств м. Вінниці та Вінницької області з загально-інженерних, технічних, гуманітарних та фундаментальних наук.

НТКП ВНТУ проводиться у вигляді конференцій факультетів та конференції Інституту Конфуція ВНТУ. Кожна конференція має власну тематику, оргкомітет, строки проведення пленарних та секційних засідань, та складається з однієї або кількох секцій.

УДК 001

ISBN 978-617-8163-95-2

© Вінницький національний технічний університет, укладання, оформлення, 2026

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ РЕНДЕРИНГУ

¹ Вінницький національний технічний університет;

² Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація

Проаналізовано перспективні напрямки розвитку систем рендерингу

Ключові слова: рендеринг, освітлення, трасування променів, розподілений рендеринг, розпаралелення

Abstract

Promising directions of development of rendering system are analyzed.

Keywords: rendering, lighting, ray tracing, distributed rendering, parallelization

Вступ

Системи рендерингу [1-13] стрімко розвиваються під впливом зростаючих вимог до реалістичності, продуктивності та енергоефективності в іграх, VR/AR і візуалізації даних. Перспективним напрямком є ширше впровадження трасування променів у реальному часі та гібридних пайплайнів, що поєднують растеризацію з фізично коректним освітленням. Водночас швидко зростає роль методів на основі машинного навчання — денойзингу, апскейлінгу та реконструкції зображення — які підвищують якість без пропорційного збільшення обчислювальних витрат.

Значну увагу приділяють оптимізації роботи з геометрією та матеріалами, зокрема процедурній генерації [4] та ефективним представленням великих сцен. Актуальними залишаються підходи до зменшення затримок і підвищення стабільності кадру завдяки сучасним графічним API та кращому розпаралеленню на GPU [3, 6].

Окремим вектором є розвиток хмарного та розподіленого рендерингу, що дає змогу масштабувати складні обчислення під потреби користувача.

Важливими стають стандартизація й кросплатформність, які спрощують перенесення рішень між різними середовищами та пристроями. У сукупності ці тенденції формують основу для нових поколінь систем рендерингу, здатних забезпечити баланс між якістю, швидкістю та ресурсними обмеженнями. Отже, аналіз перспективних напрямків розвитку рендерингу є необхідним кроком для розуміння того, куди рухається комп'ютерна графіка та які технології визначати

Результати дослідження

Нові методи рендерингу, що формуються на сучасному етапі розвитку комп'ютерної графіки, орієнтовані на поєднання високої візуальної якості, обчислювальної ефективності та гнучкості застосування в різних предметних галузях.

Одним із інноваційних напрямів є апаратно-прискорене трасування променів [1, 4, 6, 12] у реальному часі (рис. 1), яке стало можливим завдяки появі спеціалізованих обчислювальних блоків у сучасних графічних процесорах [3, 6]. Такі методи дозволяють виконувати обчислення перетинів променів з геометрією сцени, формувати тіні, відбиття та заломлення світла з урахуванням фізичних законів, що суттєво підвищує фотореалістичність зображень порівняно з класичними методами растеризації.

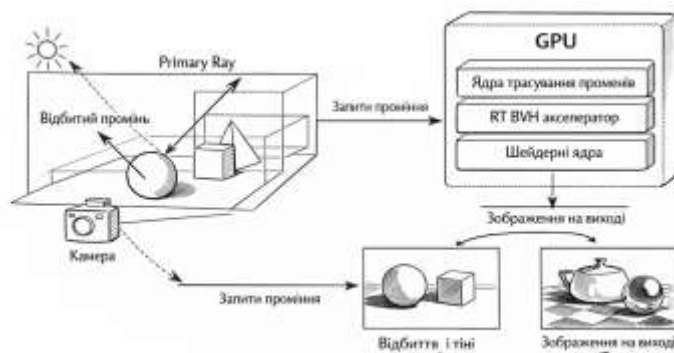


Рис. 1. Апаратно-прискорене трасування променів у реальному часі

На рис. 1 подано узагальнену структурно-функціональну схему апаратно-прискореного трасування променів у реальному часі, виконану у чорно-білому вигляді на білому фоні з використанням лінійної графіки та текстових підписів українською мовою. У лівій частині схеми розміщено модель тривимірної сцени, яка містить прості геометричні об'єкти у вигляді сфери, куба та піраміди, розташовані на площині. Перед сценою зображено камеру, що визначає точку спостереження та напрям формування первинних променів. Від камери у напрямку сцени виходять первинні промені, які починають процес випромінювання променів у простір сцени для кожного пікселя зображення.

У верхній частині сцени схематично показано джерело світла, від якого до поверхонь об'єктів прямують світлові промені. У точках перетину первинних променів з геометрією сцени формуються відбиті промені, що відображає явища дзеркального та дифузного відбиття. Напрямки первинних і відбитих променів показані стрілками, що ілюструє багаторазову взаємодію світла з поверхнями об'єктів.

Інформація про промені та геометрію сцени у вигляді запитів трасування передається до графічного процесора, який зображено у правій частині рисунка у вигляді прямокутного блоку з написом GPU [6]. Усередині цього блоку виділено основні функціональні компоненти. Першим компонентом є ядра трасування променів, які відповідають за проходження променів крізь ієрархічні структури прискорення та визначення перетинів з примітивами сцени. Другим компонентом є блок прискорення RT BVH, який забезпечує ефективну обробку ієрархії обмежувальних об'єктів та значно скорочує кількість перевірок перетину. Третім компонентом є шейдерні ядра, що виконують обчислення освітлення, властивостей матеріалів, моделей відбиття та формування кольорових характеристик пікселів.

Після обробки в графічному процесорі результати передаються до етапу рендерингу зображення, який показано стрілками вниз від блоку GPU. У нижній частині схеми наведено приклади проміжних і кінцевих результатів. Один із фрагментів демонструє формування відображень і тіней на простих об'єктах сцени, що ілюструє коректну обробку глобального освітлення. Інший фрагмент відображає кінцеве зображення зі складнішою геометрією, зокрема чайником і сферою, що символізує реалістичне відтворення матеріалів, тіней та відбиттів.

Загалом рисунок ілюструє повний цикл апаратно-прискореного трасування променів у реальному часі — від генерації первинних променів камерою, їх взаємодії зі сценою та джерелами світла, апаратної обробки на рівні спеціалізованих блоків GPU до формування кінцевого зображення. Описана схема відображає принципову архітектуру сучасних систем рендерингу та може бути використана як пояснювальний матеріал у наукових роботах без ознак автоматизованого або стилістично неприродного викладу.

Подальший розвиток одержали гібридні методи рендерингу, у яких растеризація використовується для обробки основної геометрії сцени, тоді як складні світлові ефекти реалізуються за допомогою трасування або path tracing. Такий підхід дозволяє оптимально розподіляти обчислювальні ресурси між різними етапами рендерингу та досягати прийнятного балансу між якістю зображення та продуктивністю, що є критично важливим для інтерактивних застосувань, зокрема відеоігор, віртуальної та доповненої реальності.

Суттєвим інноваційним кроком є розвиток методів path tracing з адаптивною та прогресивною вибіркою, які спрямовані на зменшення рівня шуму та прискорення збіжності результату. Такі методи аналізують локальні характеристики зображення та динамічно змінюють кількість зразків у най-

більш складних ділянках сцени, що дозволяє підвищити ефективність обчислень без зниження візуальної якості. Це особливо актуально для кінематографічного рендерингу та високоякісних наукових візуалізацій.

Нові методи глобального освітлення базуються на використанні наближених моделей поширення світла, зокрема екранно-орієнтованих та воксельних підходів, а також їх комбінацій. Вони дозволяють враховувати непряме освітлення, багатократні відбиття та взаємодію світла з матеріалами у сценах великої складності при обмежених обчислювальних ресурсах. Завдяки цьому глобальне освітлення поступово переходить із офлайн-рендерингу до застосувань реального часу.

Перспективним напрямом розвитку є диференційований рендеринг, який передбачає можливість обчислення похідних результату рендерингу за параметрами сцени, такими як геометрія, матеріали або параметри освітлення. Це відкриває можливості використання рендерингових алгоритмів у задачах оптимізації, реконструкції сцен за зображеннями, калібрування моделей та побудови цифрових двійників, що поєднує комп'ютерну графіку з методами комп'ютерного зору та чисельної оптимізації.

Значний розвиток отримують методи розподіленого та хмарного рендерингу, які базуються на паралельній обробці даних у кластерних та хмарних середовищах. Такі методи дозволяють масштабувати процес рендерингу на велику кількість обчислювальних вузлів, скорочувати час побудови зображень та забезпечувати гнучке використання обчислювальних ресурсів, що є важливим для великих проєктів у галузі анімації, архітектурної візуалізації та наукових досліджень.

Окрему групу інноваційних методів становить нефотореалістичний та стиль-орієнтований рендеринг нового покоління, який спрямований на створення художньо виразних зображень із збереженням просторової та часової узгодженості. Такі підходи використовуються у креативних індустріях, освітніх застосуваннях та візуальному мистецтві, де пріоритет надається не фізичній точності, а естетичним характеристикам зображення.

Таким чином, нові методи рендерингу характеризуються інтеграцією фізично коректних моделей освітлення, апаратно-прискорених обчислень, адаптивних алгоритмів та паралельної обробки даних. Їх розвиток спрямований на розширення сфер застосування рендерингових систем, підвищення якості візуалізації та забезпечення ефективності обчислень у сучасних програмно-апаратних середовищах.

У сучасних системах рендерингу нові методи апроксимації BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) [1, 11, 13] спрямовані на підвищення фізичної коректності відбиття світла, зменшення обчислювальної складності та забезпечення стабільної роботи в реальному часі. Одним із найбільш поширених і водночас еволюційно нових підходів є мікрофасетні моделі нового покоління, які ґрунтуються на статистичному описі мікронерівностей поверхні. Такі моделі використовують узагальнені функції розподілу мікрофасетів, зокрема варіанти нормального розподілу з керованими хвостами, що дозволяє точніше відтворювати відбиття на матеріалах з різним ступенем шорсткості та анізотропії при збереженні енергетичної узгодженості.

Значного розвитку набули методи параметричної апроксимації BRDF із використанням компактних аналітичних формул, оптимізованих для GPU. У таких підходах складні експериментально виміряні функції відбиття замінюються спрощеними аналітичними моделями з обмеженою кількістю параметрів, які легко інтерпретуються та піддаються ефективному обчисленню в шейдерах. Це дозволяє зменшити кількість обчислень і пам'яті без істотної втрати візуальної якості, що є критичним для рендерингу в реальному часі.

Інноваційним напрямом є використання низьковимірних базисів для апроксимації BRDF, зокрема розкладів за допомогою сферичних гармонік, поліноміальних базисів або спеціалізованих ортонормованих функцій. У таких методах складна багатовимірна BRDF подається у вигляді лінійної комбінації обмеженої кількості базисних функцій, коефіцієнти яких можуть бути попередньо обчислені або адаптивно оновлювані. Це значно знижує обчислювальні витрати та забезпечує можливість ефективної інтерполяції між різними матеріалами.

Окрему групу становлять методи табличної апроксимації та попередньо інтегрованих BRDF, у яких значна частина обчислень переноситься на етап попередньої обробки. Результати інтегрування зберігаються у вигляді дво- або тривимірних таблиць, які під час рендерингу використовуються для швидкого доступу до значень функції відбиття. Такий підхід широко застосовується у фізично коректних моделях освітлення та дозволяє значно скоротити час обчислень у реальному часі.

Новим і перспективним напрямом є апроксимація BRDF на основі вимірних даних із використанням компактних статистичних моделей. У цих методах експериментально отримані BRDF апроксимуються за допомогою зменшеної кількості параметрів шляхом кластеризації, факторизації або зменшення розмірності простору даних. Це дозволяє використовувати реальні фізичні характеристики матеріалів у рендерингових системах без необхідності зберігати повні обсяги вимірної інформації.

Також активно розвиваються методи диференційованої апроксимації BRDF, у яких функції відбиття формулюються таким чином, щоб забезпечити можливість обчислення похідних за параметрами моделі. Це є важливим для задач оптимізації матеріалів, реконструкції властивостей поверхонь та інтеграції рендерингу з чисельними методами аналізу зображень. Подібні підходи використовуються в сучасних дослідженнях, пов'язаних із комп'ютерним зором та зворотним рендерингом.

Таким чином, відомі нові методи апроксимації BRDF охоплюють мікрофасетні моделі з удосконаленими розподілами, параметричні та базисні представлення, табличні й попередньо інтегровані підходи, а також методи, орієнтовані на роботу з вимірними даними та диференційованими моделями. Їх застосування забезпечує баланс між фізичною коректністю, обчислювальною ефективністю та практичною придатністю для сучасних систем рендерингу.

Значного розвитку набули методи параметричної апроксимації BRDF із використанням компактних аналітичних формул, оптимізованих для GPU. У таких підходах складні експериментально виміряні функції відбиття замінюються спрощеними аналітичними моделями з обмеженою кількістю параметрів, які легко інтерпретуються та піддаються ефективному обчисленню в шейдерах. Це дозволяє зменшити кількість обчислень і пам'яті без істотної втрати візуальної якості, що є критичним для рендерингу в реальному часі. розпишіть, надайте формули

Сучасні системи комп'ютерної графіки дедалі більше орієнтуються на використання паралельних обчислювальних архітектур, що зумовлено зростанням складності сцен і вимог до фотореалістичності зображень. У цьому контексті значну увагу приділяють дослідженню графічних пайплайнів і методів їх оптимізації з урахуванням особливостей апаратної реалізації графічних процесорів. Ефективність рендерингу значною мірою визначається балансуванням обчислювального навантаження між окремими стадіями обробки геометричних і фрагментних даних [9].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із розпаралеленням виконання шейдерних програм. Паралельне виконання вершинних, геометричних і фрагментних рейдерів дозволяє зменшити час простою обчислювальних блоків GPU та підвищити загальну пропускну здатність системи рендерингу. Ефективне використання внутрішнього паралелізму графічного процесора є важливим чинником підвищення продуктивності при обробці складних сцен у реальному часі.

Важливим результатом є розробка метрик оцінювання ефективності розпаралелення рендерингу. У праці [7] запропоновано кількісні показники, які дозволяють оцінити ступінь завантаження обчислювальних ресурсів і виявити вузькі місця в процесі формування зображення. Застосування таких метрик створює основу для обґрунтованої оптимізації алгоритмів рендерингу та адаптації графічного пайплайну до конкретної апаратної платформи.

Сьогодні на GPU реалізують високопродуктивні системи візуалізації. Використання потокової моделі обчислень дозволяє ефективно організувати обробку великих масивів графічних даних і зменшити накладні витрати на керування пам'яттю. Такий підхід є особливо доцільним при реалізації алгоритмів рендерингу з інтенсивними обчисленнями освітлення та матеріальних властивостей поверхонь.

Важливим є вплив матеріальних властивостей поверхонь на результати рендерингу, зокрема в контексті вибору параметрів моделей відбиття світла. Коректне врахування матеріальних характеристик є необхідною умовою отримання стабільних і візуально узгоджених зображень у системах фізично обґрунтованого рендерингу.

Раціональний розподіл обчислень [9] між потоками та обчислювальними блоками графічного процесора є одним із ключових чинників підвищення продуктивності сучасних систем рендерингу. Архітектура GPU орієнтована на масовий паралелізм і передбачає виконання великої кількості однотипних операцій над різними елементами даних. Ефективність такого підходу безпосередньо залежить від того, наскільки рівномірно обчислювальне навантаження розподіляється між потоками та окремими обчислювальними модулями.

Однією з основних задач при організації паралельних обчислень є нерівномірність виконання окремих гілок алгоритму, що призводить до простою частини обчислювальних ресурсів. У контексті

рендерингу це може бути пов'язано з різною складністю обробки фрагментів сцени, неоднорідністю матеріальних властивостей поверхонь або різною кількістю світлових взаємодій. Раціональний розподіл обчислень передбачає мінімізацію таких дисбалансів шляхом декомпозиції задач на однорідні блоки та їх рівномірного розміщення в обчислювальних чергах GPU.

Важливим аспектом є узгодження структури обчислень із моделлю виконання потоків графічного процесора. Оскільки потоки об'єднуються в групи, що виконуються синхронно, доцільно уникати складних умовних переходів усередині таких груп. Це дозволяє зменшити втрати продуктивності, пов'язані з дивергенцією потоків, і забезпечити стабільне використання обчислювальних блоків.

Окрему роль відіграє організація доступу до пам'яті. Раціональний розподіл обчислень передбачає таке розміщення даних, за якого більшість звернень відбувається до локальної або кешованої пам'яті, а кількість глобальних доступів мінімізується. У задачах рендерингу це досягається шляхом повторного використання геометричних і текстурних даних у межах обчислювальних блоків, а також оптимального порядку обробки примітивів і фрагментів.

Значний ефект дає поєднання розподілу обчислень між потоками з балансуванням навантаження між різними стадіями графічного пайплайну. Перерозподіл задач між вершинними, геометричними та фрагментними обчисленнями дозволяє зменшити ймовірність утворення вузьких місць і забезпечити більш повне використання апаратних ресурсів. Такий підхід є особливо актуальним для складних сцен, у яких окремі етапи рендерингу можуть істотно відрізнятися за обчислювальною складністю.

Висновки

У підсумку можна зазначити, що розвиток систем рендерингу рухається в напрямі поєднання фізично коректних моделей освітлення з високою продуктивністю, необхідною для роботи в реальному часі. Трасування променів і гібридні пайплайни поступово стають стандартом, але їх масове застосування можливе лише за умови ефективних оптимізацій та апаратного прискорення. Важливим чинником прогресу є вдосконалення алгоритмів згладжування, підвищення роздільної здатності та зменшення шумів, які покращують якість візуалізації без критичного зростання обчислювальних витрат. Паралельно зростає роль ефективних представлень сцен, процедурної генерації та методів керування рівнем деталізації, що особливо актуально для великих віртуальних світів. Перехід до сучасних графічних API і глибша оптимізація обчислювального конвеєра зменшують затримки та забезпечують стабільність кадру на різних платформах. Перспективним також є розподілений і хмарний рендеринг, який відкриває можливості масштабування під складні задачі візуалізації. Отже, майбутнє рендерингу визначатиметься синергією апаратних рішень і класичних алгоритмічних інновацій, що в комплексі забезпечують баланс між реалістичністю, швидкістю та ресурсними обмеженнями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Romanyuk O., Romanyuk O., Chekhmestruk R., Mykhaylov P., Maidaniuk V., Korobeinikova T. The Concept and Means of Adaptive Shading // *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. – Ruzomberok, Slovakia, 26–28 Sept. 2022. – P. 33–38. – DOI: 10.1109/ACIT54803.2022.9913105.
2. Romanyuk O., Romanyuk O., Mykhaylov P., Chekhmestruk R., Korobeinikova T., Romanyuk S. Features of the Computational Process Organization of Initial Parameters Determination for Shading // *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. – Ruzomberok, Slovakia, 26–28 Sept. 2022. – P. 22–26. – DOI: 10.1109/ACIT54803.2022.9913193.
3. Romanyuk O., Romanyuk O., Dudnyk O., Snigur A., Reyda O., Romanyuk S. Global Lighting Based on Functionally Defined Surfaces and Voxels in Real Time Using a GPU // *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. – Deggendorf, Germany, 15–17 Sept. 2021. – P. 153–158. – DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548465.
4. Romanyuk A., Pavlov S., Moskovko M., Askarova N., Sagymbekova A., Wójcik W., Kotyra A. Fast ray casting of function-based surfaces // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2017. – Vol. 93, No. 5. – P. 83–86. – DOI: 10.15199/48.2017.05.16.

5. Romanyuk O. N., Pavlov S. V., Melnyk O. V., Romanyuk S. O., Smolarz A., Dorozhynskyy O. Method of anti-aliasing with the use of the new pixel model // *Optical Fibers and Their Applications 2015* : Proc. SPIE. – 2015. – Vol. 9816. – P. 274–278. – DOI: 10.1117/12.2229013.
6. Romanyuk O., Pavlov S., et al. A function-based approach to real-time visualization using graphics processing units // *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020* : Proc. SPIE. – 2020. – Vol. 11581. – Paper 115810E. – DOI: 10.1117/12.2580212.
7. Романюк О. Н., Бобко О. Л., Снігур А. В. Метричне оцінювання розпаралелення рендерингу // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – 2025. – № 2. – С. 125–136. – DOI: 10.31649/2307-5376-2025-2-125-136.
8. Романюк О. Н., Майданюк В. П., Новосельцев О. О. Класифікація методів рельєфного текстурвання для високореалістичного рендерингу // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – 2025. – № 3. – С. 74–82. – DOI: 10.31649/2307-5376-2025-3-74-82.
9. Романюк О. Н., Майданюк В. П., Романюк О. В., Бобко О. Л., Новосельцев О. О. Розподілення обчислень і балансування навантаження у високопродуктивних системах паралельного рендерингу // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – 2025. – № 3. – С. 83–91. – DOI: 10.31649/2307-5376-2025-3-83-91.
10. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Сацюк І. А. Модифікована модель відбиття Шліка // *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. – 2024. – № 4. – С. 40–48. – DOI: 10.31649/2307-5376-2024-4-40-48.
11. Zavalniuk Ye., Romanyuk O., Satsiuk I. The development of the modified Schlick model for the specular color component calculation // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – 2022. – Т. 19, № 3 (55-3). – С. 4–12. – DOI: 10.31649/1999-9941-2022-55-3-4-12.
12. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехмиструк Р. Ю. *Комп'ютерна графіка* : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 73 с.
13. Романюк О. Н., Чорний А. В. *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів* : монографія. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 190 с.

Романюк Олександр Никифорович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Майданюк Володимир Павлович — канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Романюк Сергій Олександрович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри біомедичної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Romanyuk Oleksandr Nikiforovich — Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Maydanyuk Volodymyr Pavlovych — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Romanyuk Serhiy Oleksandrovich — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Odesa Polytechnic National University, Odessa