

---

---

## СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

---

---

УДК 004.92

Й. Й. БЛИНСЬКИЙ, О. Я. СТАХОВ, О.В. КАДУК, Б. В. БАБІЙ

### ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНОГО СУПЕРСЕМПЛІНГУ ІЗ ПЕРЕКРИТТЯМ ТАЙЛІВ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця, Україна,  
e-mail: bilynskiy.i.j@vntu.edu.ua*

**Анотація.** У статті запропоновано новий метод адаптивного суперсемплінгу з перекриттям тайлів (AOTSS). Метод базується на розбитті зображення на квадратні тайли з додатковою зоною перекриття, що усуває артефакти на межах суміжних обчислювальних блоків. Для плавного переходу між тайлами використовується кубічна вагова функція змішування. Адаптивний розподіл обчислювальних ресурсів реалізується через функцію складності, яка враховує градієнт інтенсивності, варіацію глибини сцени та щільність країв. Кількість субпіксельних вибірок автоматично збільшується у складних ділянках і зменшується у однорідних зонах, що знижує загальне обчислювальне навантаження. Математична модель підтверджує, що похибка зменшується обернено пропорційно кореню з кількості семплів, а тайловий артефакт усувається зі зростанням ширини перекриття. Порівняльний аналіз із методами MSAA, SSAA та TAA демонструє переваги запропонованого підходу за співвідношенням якості та продуктивності. Метод є перспективним для інтеграції у GPU-орієнтовані пайплайни рендерингу реального часу.

**Ключові слова:** формування зображень, рендеринг, реалістичність, фотореалістичність, суперсемплінг, антиаліазинг, тайлова декомпозиція.

**Abstract.** The article proposes a new method of adaptive tile overlapping supersampling (AOTSS). The method is based on dividing the image into square tiles with an additional overlap zone, which eliminates artifacts at the boundaries of adjacent computational blocks. A cubic mixing weight function is used for a smooth transition between tiles. Adaptive distribution of computational resources is implemented through a complexity function that takes into account the intensity gradient, scene depth variation, and edge density. The number of subpixel samples automatically increases in complex areas and decreases in homogeneous areas, which reduces the overall computational load. The mathematical model confirms that the error decreases inversely proportional to the square root of the number of samples, and the tile artifact is eliminated with increasing overlap width. Comparative analysis with MSAA, SSAA, and TAA methods demonstrates the advantages of the proposed approach in terms of quality and performance. The method is promising for integration into GPU-oriented real-time rendering pipelines.

**Keywords:** image formation, rendering, realism, photorealism, supersampling, antialiasing, tile decomposition.

**DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-90-96**

#### ВСТУП

Необхідність покращення методів суперсемплінгу безпосередньо пов'язана з потребою підвищення реалістичності комп'ютерних зображень. Сучасні графічні системи використовуються у відеоіграх, кінематографії, архітектурному проектуванні, медичній візуалізації, системах віртуальної та доповненої реальності, де користувач очікує максимально природного та візуально достовірного відображення сцени.

Однак через дискретну природу цифрового зображення під час растеризації виникає аліазинг - спотворення контурів, яке проявляється у вигляді зубчастих меж, мерехтіння дрібних деталей та нестабільності текстур. Такі дефекти суттєво знижують рівень візуального реалізму та порушують цілісність сприйняття сцени.

---

© Й. Й. БЛИНСЬКИЙ, О. Я. СТАХОВ, О.В. КАДУК, Б. В. БАБІЙ, 2026

---

---

## СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

---

---

Класичні методи суперсемплінгу мають обмеження, які не дозволяють повною мірою забезпечити необхідний рівень фотореалізму у сучасних графічних системах.

Основною проблемою є те, що для досягнення високої якості необхідно значно збільшувати кількість субпіксельних вибірок. Це призводить до різкого зростання обчислювальної складності та часу рендерингу. У складних сценах із великою кількістю полігонів, джерел світла, прозорих поверхонь та процедурних текстур традиційний суперсемплінг стає надто ресурсоємним, особливо для систем реального часу.

Особливо важливим є покращення суперсемплінгу для динамічних сцен. Під час руху камери або об'єктів артефакти аліайзингу стають більш помітними через часову нестабільність контурів і текстур. Навіть незначне мерехтіння може руйнувати ефект присутності у VR- та AR-системах. Тому сучасні алгоритми повинні враховувати не лише просторові, а й часові характеристики зображення, забезпечуючи стабільність деталей між кадрами.

Крім того, традиційний суперсемплінг неефективно використовує обчислювальні ресурси, оскільки однакова кількість вибірок застосовується до всіх пікселів сцени. У результаті значна частина обчислень витрачається на однорідні області, де додаткові вибірки практично не впливають на якість зображення. Це обґрунтовує необхідність створення адаптивних методів суперсемплінгу, які концентрують обчислення лише у проблемних зонах: на межах полігонів, у ділянках з високими градієнтами кольору або складними світловими ефектами. Такий підхід дозволяє одночасно підвищити якість візуалізації та зменшити навантаження на процесор.

Таким чином, покращення суперсемплінгу є необхідною умовою підвищення реалістичності комп'ютерної графіки.

Мета статті – підвищення якості та ефективності формування зображень шляхом розробки методу адаптивного суперсемплінгу із перекриттям тайлів.

### 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Проблема аліайзингу є однією з основних у сучасній комп'ютерній графіці та системах формування реалістичних зображень. Аліайзинг (рис. 1) виникає внаслідок дискретизації безперервного графічного сигналу та проявляється у вигляді «сходинок» на межах об'єктів, мерехтіння дрібних деталей, спотворення текстур і нестабільності зображення під час руху сцени.

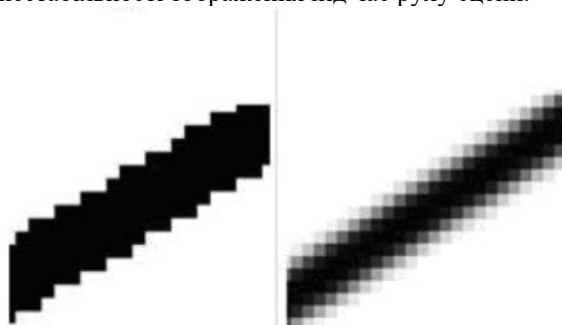


Рисунок 1 – Приклад аліайзингу

Для усунення цих недоліків широко використовуються методи антиаліайзингу, серед яких особливе місце займає суперсемплінг (англ. Supersampling Anti-Aliasing, SSAA) [1-7]. Принцип суперсемплінгу полягає у формуванні декількох субпіксельних вибірок для кожного пікселя з подальшим усередненням результатів. Такий підхід дозволяє значно підвищити якість відображення контурів і текстур, однак потребує суттєвих обчислювальних ресурсів.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється зменшенню обчислювальної складності суперсемплінгу при збереженні високої якості зображення. У роботі [2] проведено комплексний аналіз методів часового антиаліайзингу (англ. Temporal Anti-Aliasing, TAA), які фактично є розвитком ідей суперсемплінгу у часовій області. Показано, що часовий суперсемплінг базується на накопиченні субпіксельної інформації з попередніх кадрів, що дозволяє досягати якості, близької до класичного SSAA, але з меншою кількістю вибірок у поточному кадрі. Водночас автори підкреслюють проблему появи розмиття у динамічних сценах.

Подальший розвиток часового суперсемплінгу пов'язаний із використанням перепроєкції та валідації історії кадрів. У роботі [3] досліджуються конвеєри рендерингу, у яких часовий суперсемплінг інтегрується з просторовими методами реконструкції. Автор показує, що використання зміщень субпіксельних вибірок дозволяє накопичувати інформацію про дрібні деталі сцени протягом декількох

---

---

## СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

---

---

кадрів. Завдяки цьому суттєво зменшується мерехтіння текстур та покращується стабільність зображення у реальному часі. Одним із перспективних напрямів є адаптивний суперсемплінг, при якому додаткові вибірки формуються лише в проблемних ділянках зображення. У роботі [4] запропоновано метод оцінювання градієнтів для адаптивного суперсемплінгу. Автори використовують аналіз локальних змін яскравості та кольору для визначення ділянок із високим рівнем аліайзingu. Такий підхід дозволяє суттєво знизити кількість обчислень порівняно з повним суперсемплінгом без помітної втрати якості.

Актуальність адаптивного суперсемплінгу особливо зросла з поширенням трасування променів у реальному часі. У роботі [5] розглянуто реконструкцію зображень для трасування променів із використанням адаптивного розподілу вибірок. Автори відзначають, що при трасуванні променів основним джерелом шуму та аліайзingu є недостатня кількість променів на піксель. Запропонований метод дозволяє концентрувати обчислення лише у складних ділянках сцени, що забезпечує підвищення продуктивності систем рендерингу.

Сучасний розвиток суперсемплінгу тісно пов'язаний із використанням штучного інтелекту та нейронних мереж. У роботі [6] запропоновано метод нейронного суперсемплінгу для високоякісного рендерингу у реальному часі. Метод використовує нейронну мережу для реконструкції зображення високої роздільної здатності на основі кадру, сформованого у нижчій роздільній здатності. Автори доводять, що нейромережний суперсемплінг дозволяє досягати якості, близької до класичного SSAA, при значно меншому навантаженні на GPU. Практична реалізація нейромережевого суперсемплінгу отримала широке поширення у сучасних графічних процесорах. Технології NVIDIA DLSS та Intel XeSS використовують часову акумуляцію, вектори руху та AI-реконструкцію для формування високодеталізованих кадрів. Такі методи дозволяють не лише зменшити аліайзінг, а й підвищити продуктивність рендерингу за рахунок виконання частини обчислень у нижчій роздільній здатності.

Використання AI-реконструкції стало одним із напрямів розвитку сучасних систем формування графічних зображень [6, 9]. У роботі Баррон та ін. [7] запропоновано метод, який забезпечує антиаліайзінг у нейронних полях випромінювання шляхом багатомасштабного подання сцени. Автори показують, що використання тір-рівнів дозволяє зменшити високочастотні артефакти та покращити стабільність реконструкції при зміні точки спостереження. Метод забезпечує формування більш реалістичних зображень без суттєвого збільшення кількості вибірок. Аналіз сучасних досліджень показує, що розвиток суперсемплінгу відбувається у напрямі поєднання просторового, часового та нейромережевого антиаліайзingu. Основною тенденцією є зменшення кількості субпіксельних вибірок при збереженні або покращенні якості зображення. Особливу увагу приділяють адаптивним методам, часовому накопиченню інформації та AI-реконструкції. Перспективними напрямками залишаються інтеграція суперсемплінгу з трасуванням променів, нейронним рендерингом та високопродуктивними GPU-системами, що дозволяє формувати фотореалістичні зображення у режимі реального часу.

## 2. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У сучасній комп'ютерній графіці однією з основних проблем залишається аліайзінг, який виникає внаслідок дискретизації безперервних сигналів зображення під час їхнього відображення на растрових пристроях. Цей ефект проявляється у вигляді сходинкових артефактів на діагональних лініях, мерехтіння дрібних деталей, втрати геометричної точності та загального зниження реалістичності сцени. Незважаючи на значний розвиток методів усунення аліайзingu, таких як SSAA, MSAA та TAA, жоден із них не є універсальним рішенням, оскільки кожен має власні обмеження щодо продуктивності, якості або стабільності результату.

У зв'язку з цим актуальним є створення нових гібридних методів, які поєднують переваги існуючих підходів та мінімізують їхні недоліки. У даній роботі запропоновано новий метод адаптивного суперсемплінгу з перекриттям тайлів, який базується на комбінації просторового суперсемплінгу, адаптивного розподілу обчислювальних ресурсів та перекриття обчислювальних блоків для усунення артефактів на межах тайлової декомпозиції.

Основна ідея методу полягає у розбитті вихідного зображення на набір квадратних тайлів розміром

$$T \times T,$$

що відповідає стандартному підходу, який широко використовується в сучасних графічних процесорах. Однак, на відміну від класичних методів, у запропонованому підході кожен тайл розширюється додатковою ділянкою перекриття  $O$  (рис. 2) що дозволяє забезпечити безперервність результату на межах сусідніх тайлів.

Ефективна ділянка обчислення для кожного тайла визначається як

## СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

$$(T + 2 \times O) \times (T + 2 \times O),$$

де центральна частина використовується для фінального запису пікселів, а периферійні ділянки служать для узгодження значень між сусідніми обчислювальними блоками. Це дозволяє уникнути класичної проблеми появи швів між тайлами, яка часто виникає у паралельних рендерингових системах.

Всередині кожного тайла застосовується процедура суперсемплінгу, яка полягає у розрахунку значення кожного пікселя на основі множини підсемплів. Кількість семплів визначається формулою

$$N = k^2,$$

де  $k$  є кількістю підсемплів уздовж однієї координатної осі. Таким чином, при  $k = 2$  отримуємо 4 семпли на піксель, при  $k = 4$  - 16 семплів і так далі.

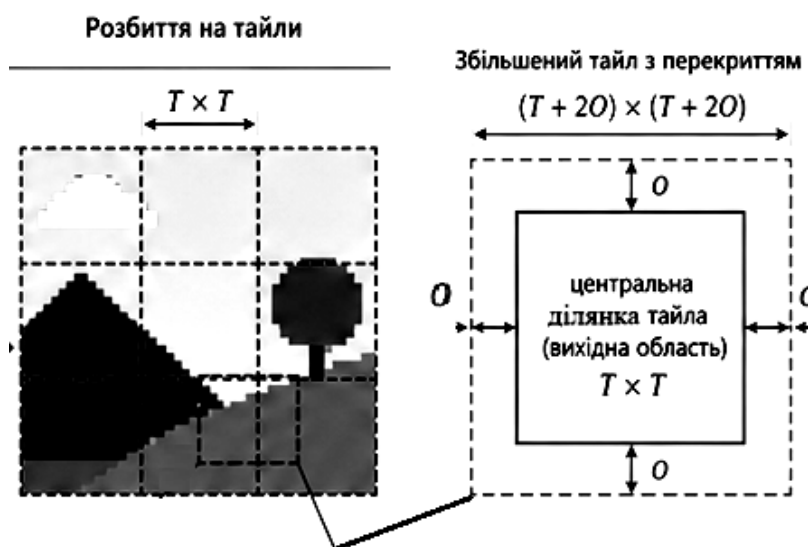


Рисунок 2 – Приклад розбиття зображення на тайли з перекриттями

Координати семплів задаються з використанням джиттерингу для зменшення регулярних артефактів дискретизації:

$$(x_i, y_i) = (x + r_i, y + s_i),$$

де  $r_i$  та  $s_i$  є випадковими або псевдовипадковими значеннями в інтервалі

$$r_i, s_i \in [-0.5, 0.5].$$

Значення інтенсивності пікселя визначається як середнє арифметичне значень усіх семплів:

$$\hat{I}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i, y_i),$$

де  $I(x_i, y_i)$  є значенням у точці семплювання.

Класичний суперсемплінг не вирішує проблему артефактів на межах тайлів, оскільки кожен тайл обчислюється незалежно. Для усунення цієї проблеми у запропонованому методі використовується механізм перекриття та вагового змішування результатів сусідніх тайлів (рис. 3).

Якщо позначити  $I_A$  як значення пікселя, обчислене в поточному тайлі, а  $I_B$  як значення з сусіднього тайла, то фінальне значення визначається формулою

$$I(x, y) = w(x, y)I_A + (1 - w(x, y))I_B,$$

де  $w(x, y)$  є ваговою функцією, що залежить від відстані до межі основної ділянки тайла.

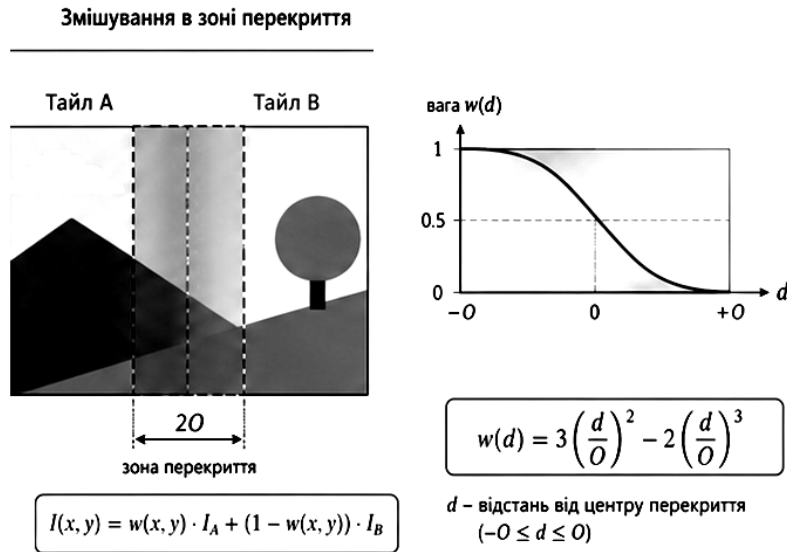


Рисунок 3 – Приклад змішування тайлів в зоні перекриття

Найчастіше використовується гладка кубічна інтерполяція виду

$$w(d) = 3\left(\frac{d}{O}\right)^2 - 2\left(\frac{d}{O}\right)^3,$$

де  $d$  є відстанню від точки до межі перекриття, а  $O$  визначає ширину цієї ділянки. Такий підхід забезпечує плавний перехід між тайлами без різких змін інтенсивності.

Важливою складовою методу є адаптивний розподіл обчислювальних ресурсів. Оскільки різні ділянки зображення мають різну складність, доцільно змінювати кількість семплів залежно від локальних характеристик сцени.

Для цього вводиться функція складності  $L$ , яка визначається як

$$L = \alpha |\nabla I| + \beta V_{depth} + \gamma E_{density},$$

де  $|\nabla I|$  є градієнтом інтенсивності, що характеризує контрастність зображення,  $V_{depth}$  є варіацією глибини сцени, а  $E_{density}$  відповідає щільності країв. Коефіцієнти  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$  визначають внесок кожного компонента.

На основі цієї функції кількість семплів визначається як

$$N = N_{min} + (N_{max} - N_{min})\sigma(L),$$

де  $\sigma(L)$  є сигмоїдальною функцією нормалізації:

$$\sigma(L) = \frac{1}{1 + e^{-k(L-L_0)}}.$$

Таким чином, у гладких ділянках сцени використовується мінімальна кількість семплів (рис. 4), тоді як у складних ділянках їх кількість автоматично збільшується.

Математична модель похибки методу базується на порівнянні безперервного сигналу зображення  $I(x, y)$  та його дискретної апроксимації  $\hat{I}(x, y)$ . Локальна похибка визначається як

$$E(x, y) = \left| I(x, y) - \hat{I}(x, y) \right|.$$

# СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

## Адаптивний суперсемплінг

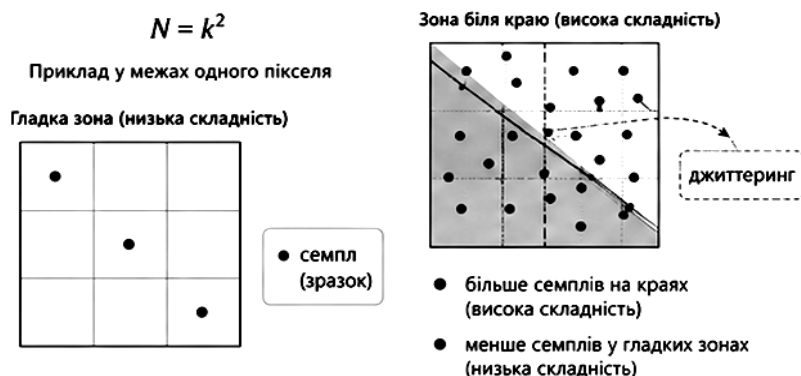


Рисунок 4 – Приклад адаптивного використання різних кількостей семплів

Глобальна оцінка якості може бути представлена через середньоквадратичну похибку:

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (I_j - \hat{I}_j)^2$$

де  $M$  є кількістю пікселів. Оскільки оцінка базується на стохастичному семплюванні, дисперсія результату зменшується обернено пропорційно кількості семплів:

$$\text{var}(\hat{I}) \approx \frac{\sigma^2}{N}$$

Це призводить до залежності середньої похибки від кількості семплів:

$$E_{avg} \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Додатково необхідно враховувати похибку, що виникає через тайлову декомпозицію. Вона пов'язана з різкими переходами між локальними ділянками обчислення і може бути описана як

$$E_{tile} \propto |\nabla I| (1 - w(x, y))$$

У запропонованому методі ця похибка суттєво зменшується завдяки використанню перекриття та вагового змішування. Загальна похибка системи може бути представлена як

$$E_{AOTSS} = E_{sampling} + E_{tile} + E_{overlap}$$

де кожна складова відповідає окремому джерелу артефактів. У граничному випадку, коли ширина перекриття прямує до нескінченності, тобто  $o \rightarrow \infty$ , похибка методу прямує до похибки чистого суперсемплінгу без тайлових артефактів:

$$\lim_{o \rightarrow \infty} E_{AOTSS} = E_{sampling}$$

Порівняльний аналіз показує, що запропонований метод має переваги над класичними підходами MSAA, SSAA та TAA за рахунок кращого балансу між якістю та продуктивністю. MSAA ефективний для країв полігонів, але не усуває внутрішній аліайзинг текстур. SSAA забезпечує високу якість, але є надто ресурсомістким. TAA може створювати артефакти розмиття. Метод поєднує переваги просторового суперсемплінгу та адаптивної обробки, зменшуючи обчислювальне навантаження за рахунок локального масштабування кількості семплів та паралельної обробки тайлів.

## ВИСНОВКИ

Отже, запропонований метод є ефективним гібридним підходом до усунення аліайзингу, який поєднує адаптивність, паралельність та просторову узгодженість результату. Його математична модель

---

---

## СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

---

---

демонструє зменшення похибки зі зростанням кількості семплів та ефективно усує артефакти на межах тайлів завдяки механізму перекриття. Метод є перспективним для використання в реальному часі в сучасних графічних системах та може бути інтегрований у GPU-орієнтовані пайплайни рендерингу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Marrs, J. Spjut, H. Gruen, R. Sathe, and M. McGuire, “Improving Temporal Antialiasing with Adaptive Ray Tracing,” in *Ray Tracing Gems I*, Berkeley, CA, USA: Apress, 2019, pp. 353–370.
2. L. Yang, S. Liu, and M. Salvi, “A Survey of Temporal Antialiasing Techniques,” *Computer Graphics Forum*, vol. 39, no. 2, pp. 607–621, 2020.
3. Wronski. “Temporal supersampling and antialiasing.” BartWronski.com. <https://bartwronski.com/2014/03/15/temporal-supersampling-and-antialiasing/> (accessed May 12, 2026)
4. Schied, C. Peters, and C. Dachsbacher, “Gradient Estimation for Real-Time Adaptive Supersampling,” *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Vol. 1, Issue 2, Art. no. 24, 2018.
5. B. Jin, I. Ihm, B. Chang, C. Park, W. Lee, and S. Jung, “Selective and adaptive supersampling for real-time ray tracing,” in *HPG '09: Proceedings of the Conference on High Performance Graphics 2009*, 2009, pp. 117-125.
6. L. Xiao, S. Nouri, M. Chapman, A. Fix, D. Lanman, and A. Kaplanyan, “Neural Supersampling for Real-Time Rendering,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 39, no. 4, pp. 142:1–142:12, 2020.
7. Bisikalo, O.; Kharchenko, V.; Kovtun, V.; Krak, I.; Pavlov, S. Parameterization of the Stochastic Model for Evaluating Variable Small Data in the Shannon Entropy Basis. *Entropy* 2023, 25, 184.
8. Intellectual technologies in medical diagnostics, treatment and rehabilitation: monograph / [S.V. Pavlov, O.G. Avrunin, S.M. Zlepko, E.V. Bodianskyi and others]; edited by S. Pavlov, O. Avrunin. – Vinnytsia: PP “TD “Edelweiss and K”, 2019. – 260 p.
9. J. T. Barron, B. Mildenhall, M. Tancik, P. Hedman, R. Martin-Brualla, and P. P. Srinivasan, “Mip-NeRF: A Multiscale Representation for Anti-Aliasing Neural Radiance Fields,” in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, pp. 5855–5864.

Дата надходження: 10.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до  
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**БЛИНСЬКИЙ ЙОСИП ЙОСИПОВИЧ** – д.т.н., професор кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: bilynskyj.i.j@vntu.edu.ua](mailto:bilynskyj.i.j@vntu.edu.ua),  
<https://orcid.org/0000-0002-9659-7221>

**СТАХОВ ОЛЕКСІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ** – д-р філософії, ст. викладач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,  
[e-mail: aleksey.stahov@gmail.com](mailto:aleksey.stahov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4901-3211>

**КАДУК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ** – Ph.D., доцент кафедри комп’ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Україна,  
[e-mail: o.kaduk@gmail.com](mailto:o.kaduk@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-2388-9813>

**БАБІЙ БОГДАН ВАЛЕНТИНОВИЧ** – студент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: bbabij410@gmail.com](mailto:bbabij410@gmail.com),  
<https://orcid.org/0009-0005-9799-9870>

**Yosyp BILYNSKY, Oleksiy STAKHOV, Oleksandr KADUK, Bogdan BABIJ**  
**IMAGE FORMATION USING ADAPTIVE SUPERSAMPLING WITH OVERLAP TILES**  
Vinnytsia National Technical University