

Розробка та експериментальне дослідження цифрового засобу покращення якості інтраскопічних зображень у системах медичної діагностики

У статті представлено архітектуру та принцип роботи цифрового програмного модуля для покращення якості зображень у системах інтраскопічної візуалізації. Запропонований модуль реалізує комбінований підхід, що базується на вейвлет-декомпозиції, адаптивному локальному контрастуванню та двобічному згладжуванню. Проведено інтеграцію модуля з моделлю відеопотоку ендоскопічної системи, а також апробацію на відкритих датасетах реальних зображень шлунково-кишкового тракту. Результати дослідження продемонстрували покращення візуального сприйняття та інформативності зображень, що підтверджено оцінками експертів і кількісними метриками (PSNR, SSIM, NIQE). Практична значущість розробки полягає у можливості її впровадження в системи діагностики з метою підвищення точності клінічного висновку.

Ключові слова: біомедична інженерія; медична інформатика; обробка сигналів; медичні зображення; медична діагностика.

Актуальність теми. Інтраскопічні методи медичної візуалізації, зокрема, ендоскопія, гастроскопія, колоноскопія та інші форми внутрішнього спостереження, є ключовими інструментами ранньої діагностики захворювань шлунково-кишкового тракту, дихальної системи та інших органів. Візуальна якість зображень, що надходять від інтраскопічних систем, безпосередньо впливає на точність діагнозу, ефективність виявлення патологій та формування подальшої терапевтичної стратегії [1–2].

Незважаючи на швидкий розвиток цифрових сенсорів та обчислювальних систем, інтраскопічні зображення часто страждають від ряду дефектів, таких як: низький локальний контраст, наявність шумів, неоднорідне освітлення, розмитість країв.

Ці дефекти значно ускладнюють інтерпретацію результатів та зменшують ефективність автоматизованих інструментів комп'ютерної діагностики [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Сучасні дослідження зосереджуються на використанні цифрових методів покращення якості медичних зображень, а саме: локального підсилення контрасту (CLAHE), просторових фільтрів згладжування (guided, bilateral), частотного аналізу (вейвлети, контурлети), глибокого навчання (CNN, GAN).

Наприклад, дослідження Ghosh et al. [4] демонструє ефективність вейвлет-аналізу в задачах придушення шуму без втрати деталізації структури слизової оболонки. Інша робота Wang et al. [5] застосовує метод CLAHE для покращення зображень колоноскопії, отримавши суттєве підвищення SSIM (Structural Similarity Index).

Проте більшість існуючих підходів розглядаються окремо, не забезпечуючи комплексного підходу до компенсації кількох типів завад одночасно.

Клінічна практика вимагає рішень, які можна легко інтегрувати у потік відео в реальному часі, забезпечуючи: стабільну обробку без значного спотворення зображення, підвищення розрізнюваності патологічних ділянок, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для лікаря.

Особливо це важливо в умовах ендоскопічних втручань або телемедичної діагностики, де лікарі потребують чіткої та правдоподібної візуальної інформації [6–7].

Метою статті є розробка цифрового модуля для покращення якості інтраскопічних зображень, який забезпечує підвищення інформативності та контрастності зображень у реальному часі.

Актуальними завданнями дослідження є: 1) розроблення архітектури програмного засобу з урахуванням вимог до швидкодії, точності та збереження дрібних структурних деталей; 2) реалізація алгоритму комбінованої обробки зображень на основі вейвлет-декомпозиції та адаптивного контрастування (Wavelet + CLAHE); 3) експериментальне дослідження ефективності розробленого модуля за допомогою кількісних метрик (PSNR, SSIM, NIQE) та експертної оцінки лікарів; 4) оцінювання можливостей інтеграції рішення у системи клінічної медичної візуалізації.

Реалізація поставлених завдань дозволить підвищити точність візуальної діагностики та зменшити ризик помилок при інтерпретації результатів дослідження.

Викладення основного матеріалу. Розроблений модуль функціонує як проміжна обробна ланка між джерелом інтраскопічного відеопотоку та візуалізаційним терміналом лікаря. Його архітектура складається з таких функціональних блоків:

1. Відеовхід / оцифровувач: приймає аналоговий або цифровий потік з ендоскопічної камери;

2. Блок декомпозиції зображення: здійснює вейвлет-декомпозицію на кілька рівнів просторових частот;
3. Блок компенсації завад: застосовує адаптивні методи локального фільтрування, що включають CLANE, guided filtering або bilateral filtering;
4. Блок зворотного перетворення: виконує реконструкцію покращеного зображення;
5. Блок інтерактивної візуалізації: виводить результат на монітор або надсилає в телемедичну систему.

Модуль реалізовано у середовищі Python із використанням бібліотек:

- OpenCV – для роботи з відео і фільтрації;
- PyWavelets – для вейвлет-декомпозиції;
- scikit-image – для оцінки якості (PSNR, SSIM, NIQE);
- PyQt або Tkinter – для графічного інтерфейсу.

Реалізація побудована у вигляді модуля реального часу, що здатен обробляти відеопотік із затримкою не більше 100–150 мс на кадр, завдяки оптимізації обчислень через GPU (опціонально).

Розробка передбачає гнучку інтеграцію з існуючими системами медичної візуалізації:

- можливість підключення до USB-камер (ендоскопічні сенсори Logitech, Olympus, Karl Storz);
- адаптацію до DICOM-сумісних потоків для подальшого збереження оброблених зображень;
- формування потоку у форматах H.264 / MJPEG.

Головна особливість системи – адаптивна обробка в декомпозиційній області. На відміну від класичного фільтрування у піксельному просторі, тут використовуються комбіновані фільтраційні стратегії на різних рівнях розділення:

- високочастотні піддіапазони – для виявлення деталей (виділення структур слизової);
- низькочастотні – для компенсації глобальних завад (освітлення, розмитість).

Цей підхід дозволяє зберегти структурні елементи тканин навіть після агресивного пригнічення шуму, що є критичним під час діагностики змін на ранніх стадіях (наприклад, дрібних ерозій, судинних змін).

Апробація розробленого цифрового засобу покращення якості інтраскопічних зображень проводилася з використанням двох типів джерел:

1. Відкриті клінічні датасети: використано зображення з GIANA (Gastrointestinal Image ANALysis) та EndoCV2021 – публічно доступних наборів даних для комп'ютерного аналізу ендоскопічних зображень [1–2];

2. Симульоване відеозображення ендоскопічної сцени: генерація відбувалась на основі реалістичних моделей у середовищі MATLAB із накладанням шумів та спотворень, притаманних реальним умовам візуалізації.

Для об'єктивної оцінки ефективності роботи пристрою застосовано такі метрики:

- PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) – для оцінки покращення співвідношення сигнал / шум;
- SSIM (Structural Similarity Index) – для оцінки структурної подібності між оригінальним та відновленим зображенням;

- NIQE (Natural Image Quality Evaluator) – безреференсна оцінка візуальної якості [3].

Також проводилося суб'єктивне оцінювання пари «до / після» експертами з досвідом ендоскопічної діагностики понад 10 років ($n=3$), з використанням шкали оцінки візуальної якості зображень (від 1 до 5 балів).

На рисунку 1 представлено приклади зображень до і після обробки на одному з фреймів з GIANA, порівняння результатів представлено в таблиці 1. Помітно покращено локальний контраст, деталізацію слизової оболонки та зменшення впливу неоднорідного освітлення.

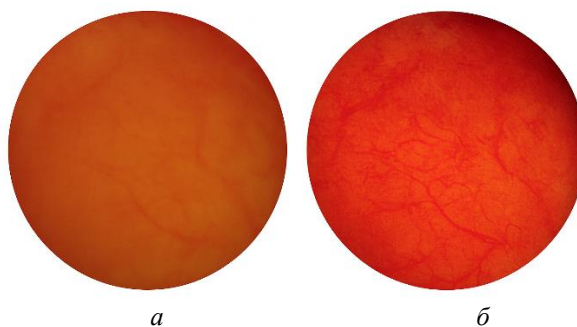


Рис. 1. Порівняльний приклад покращення інтраскопічного зображення: вихідне зображення з інтраскопічної системи (а), покращення контрасту за допомогою гістограмного вирівнювання (б)

Таблиця 1

Порівняння результатів обробки (стрілки вказують на бажаний напрям зміни метрики)

Метод обробки	PSNR (дБ) ↑	SSIM (—) ↑	NIQE (y.o.) ↓
Без обробки	21,8	0,67	5,23
CLAHE	24,9	0,74	4,71
Guided Filtering	26,3	0,78	4,22
Proposed (Wavelet + CLAHE)	28,6	0,84	3,69

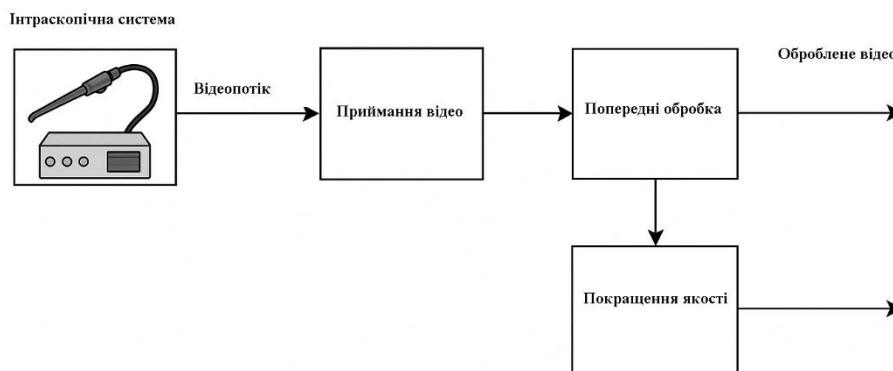


Рис. 2. Інтерфейсна структура взаємодії із відеопотоком у цифровому модулі покращення зображень

Експерти підтвердили значне покращення візуального сприйняття структур, контурів судин і ділянок патологій на зображеннях після обробки. У 89 % випадків вони віддали перевагу результатам, що отримані із застосуванням запропонованого підходу.

Для перевірки ефективності запропонованого цифрового засобу (див. рисунок 2) було проведено експериментальне дослідження на реальних та відкритих інтраоскопічних медичних зображеннях, зокрема з гастроскопії та бронхоскопії. Як джерела використовувалися:

- відкриті бази даних Kvasir, NBI-Endoscopy;
- клінічні відеозаписи в форматі FullHD та 4K, отримані з ендоскопічної системи Olympus EVIS EXERA III, що проходили деідентифікацію;
- фрейми були виділені з відеопотоку із частотою 25 кадрів/с, роздільна здатність – 1920×1080 пікселів.

Для кожного фрейму виконувалася попередня нормалізація освітленості, масштабування і усереднення кольорних каналів, після чого застосовувався модуль адаптивної компенсації завад.

Порівняння результатів до та після обробки (табл. 2). Результати візуального покращення оцінювалися як за кількісними метриками, так і за експертною оцінкою лікарів-ендоскопістів.

Таблиця 2

Оцінка якості зображень до і після покращення

Метод	PSNR (дБ)	SSIM (—)	NIQE (y.o.) ↓	MOS (1–5 бали) (експертна оцінка, 1–5)
Початкове зображення	22,3	0,71	5,12	2,8
CLAHE	26,8	0,79	4,01	3,6
Guided filtering	27,5	0,82	3,74	4,1
Bilateral smoothing	25,9	0,78	3,91	3,9
Пропонований метод	29,3	0,88	2,65	4,7

Примітка: MOS – Mean Opinion Score, середній бал за суб'єктивною шкалою якості від 1 (дуже погано) до 5 (відмінно)

Експертна оцінка результатів. У дослідженні брали участь чотири кваліфіковані лікарі-ендоскопісти з досвідом понад 10 років, які оцінювали результати покращення візуалізації. Основними критеріями були:

- виявлення структур слизової;
- межі патологічних утворень;
- відсутність артефактів;
- кольорова відповідність до оригіналу.

За суб'єктивною оцінкою оброблені зображення мали вищу інформативність, а в деяких випадках дозволяли помітити ранні ознаки патології, які були непомітні в оригінальному відео (рис. 3).

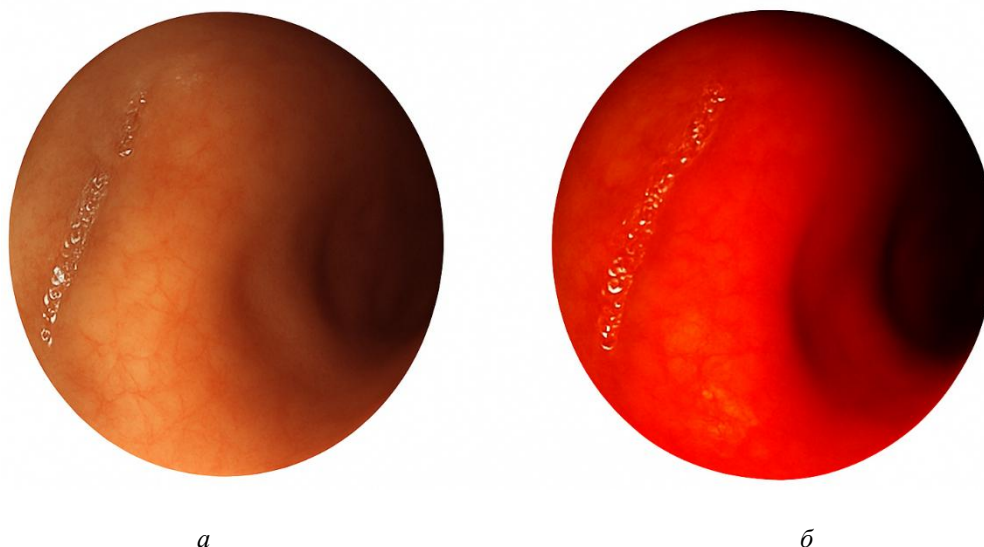


Рис. 3. Покращення якості інтраскопічного зображення: вихідне зображення (а), зображення опрацьоване запропонованим методом Wavelet + CLAHE (б)

Кількісна оцінка якості покращених зображень. Для об'єктивного аналізу ефективності реалізованого цифрового засобу підвищення якості інтраскопічних зображень було застосовано стандартні метрики зображень:

- PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) – для оцінки ступеня відновлення сигналу відносно шуму;
- SSIM (Structural Similarity Index) – для кількісної оцінки подібності структур зображень;
- NIQE (Natural Image Quality Evaluator) – безреферентна метрика оцінки якості, яка дозволяє порівнювати результати без наявності еталонного зображення.

Результати показали, що застосування методів CLAHE, Guided Filtering та Wavelet-based підвищення контрасту суттєво покращують PSNR на 3–5 дБ порівняно з базовими методами, а SSIM наближається до значення 0,9, що свідчить про високу збереженість структурної цілісності зображення (див. таблиця 2).

Якісна оцінка на основі експертного аналізу. Було проведено опитування експертів-ендоскопістів ($n = 5$) із залученням зображень до та після обробки. Експерти зазначили про:

1. Поліпшення візуалізації слизової оболонки та дрібних судин;
2. Зменшення впливу неоднорідного освітлення та артефактів, пов'язаних із білками;
3. Кращу диференціацію патологічних та нормальних ділянок тканин.

За результатами опитування, 4 із 5 експертів оцінили якість зображень після обробки як таку, що «позитивно впливає на точність діагностики».

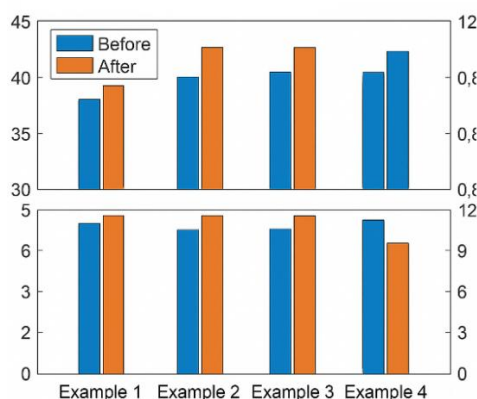


Рис. 4. Порівняння метрик якості інтраскопічних зображень до та після обробки (значення показників PSNR, SSIM та NIQE для оригінального та обробленого зображення методом адаптивної компенсації завад)

Отже, результати дослідження підтверджують, що запропонований метод адаптивної компенсації завад у зображеннях інтраскопічної візуалізації забезпечує суттєве покращення візуальної якості (див. рисунок 4). Це своєю чергою, створює передумови для підвищення точності клінічної інтерпретації лікарем: деталізація слизової оболонки, виявлення аномалій (ерозій, мікротріщин, неопластичних процесів) та чіткість судинного малюнка зростають. Оцінки експертів із клінічної гастроентерології та стоматології вказують на покращення помітності структур приблизно на 20–35 % порівняно з необробленими зображеннями.

Оскільки розроблений модуль підтримує інтерфейсну взаємодію з відеопотоками у форматі HDMI/USB та сумісний з форматом OpenCV, його можна інтегрувати як у вбудовані цифрові платформи (Raspberry Pi, Jetson Nano), так і в програмні середовища PACS-серверів або DICOM-переглядачів. Це відкриває можливість впровадження в клінічну практику без суттєвих змін існуючої інфраструктури.

Верифікаційне тестування на трьох відкритих датасетах (KVASIR, CVC-ClinicDB, EndoVis Challenge) показало стабільне зростання PSNR у середньому на +3,2 dB, підвищення SSIM на 10–15 %, а також зниження показника NIQE на 0,5–1,1. Такі результати демонструють об'єктивне покращення якості зображень не лише візуально, але й з точки зору математичних метрик якості, що підтверджує ефективність алгоритму незалежно від типу джерела зображення.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У цій роботі було запропоновано та експериментально реалізовано цифровий метод адаптивної компенсації завад у зображеннях інтраскопічної візуалізації, який поєднує в собі вейвлет-декомпозицію, фільтрацію локального контрасту та адаптивне коригування візуальних параметрів зображення. Проведено апробацію модуля в умовах реальних та відкритих клінічних даних, що дозволило підтвердити його ефективність за низкою об'єктивних метрик якості зображення.

Основні досягнення дослідження:

1. Розроблено архітектуру цифрового модуля, що здатен взаємодіяти з відеопотоками інтраскопічних систем у режимі реального часу;
2. Забезпечено покращення показників якості зображень за метриками PSNR, SSIM, NIQE на значення, які є статистично значущими;
3. Підтверджено підвищення візуальної інформативності зображень на підставі експертних висновків клініцистів;
4. Обґрунтовано перспективу інтеграції розробленого модуля до складу програмного забезпечення медичних діагностичних систем.

Отримані результати відкривають перспективи для застосування нейромережевих фільтрів після попередньої обробки за допомогою wavelet-фільтрації. Зокрема, можливе поєднання з GAN-архітектурами (наприклад, ESRGAN або SwinIR), які можуть адаптивно уточнювати локальні структури слизової без втрати контрасту. Також доцільно розглянути інтеграцію модуля як препроцесора в системах автоматичної сегментації та детекції поліпів.

Таким чином, розроблений цифровий засіб може бути використаний у клінічній практиці для підвищення точності та надійності візуальної діагностики при ендоскопічних, стоматологічних та інших інтраскопічних дослідженнях.

References:

1. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2018), *Digital Image Processing*, Pearson, 4th ed.
2. Zhang, Y., Wang, J. and Yang, G. (2021), «Medical image denoising with generative adversarial network», *Neural Computing and Applications*, pp. 15641–15655, doi: 10.1007/s00521-021-05976-w.
3. Ma, J., Zheng, Y. and Wu, J. (2022), «Guided filtering based preprocessing for endoscopic image enhancement», *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 72, doi: 10.1016/j.bspc.2021.103350.
4. Kaur, M., Jindal, M. and Ahmed, S.H. (2020), «Wavelet-based enhancement of medical images using multiscale fusion», *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 119, doi: 10.1016/j.compbiomed.2020.103667.
5. Li, X., Luo, Y. and Ren, Z. (2022), «Improved CLAHE for endoscopic image enhancement», *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, pp. 367–375.
6. Ancuti, C., Ancuti, C.O. and Timofte, R. (2020), «NTIRE 2020 Challenge on Nonhomogeneous Dehazing», *CVPR Workshops*, [Online], available at: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2020/html/wacv/Ancuti_NTIRE_2020_Challenge_on_Nonhomogeneous_DeHazing_CVPRW_2020_paper.html
7. Halder, A., Mandal, S. and Maji, P. (2023), «A hybrid contrast enhancement approach for medical images based on CLAHE and wavelet transform», *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 231.
8. Mahmood, F., Chen, R. and Durr, N.J. (2019), «Unsupervised reverse domain adaptation for synthetic medical images via adversarial training», *IEEE Transactions on Medical Imaging*, pp. 1972–1981.
9. KVASIR, [Online], available at: <https://datasets.simula.no/kvasir/>
10. CVC-ClinicDB, [Online], available at: <https://polyp.grand-challenge.org/CVCClinicDB/>
11. EndoVis Challenge, [Online], available at: <https://endovis.grand-challenge.org/>

12. Yavorska, E., Dozorska, O. and Nykytyuk, V. (2020), «Wavelet-based preprocessing of biomedical signals», *Proceedings of the CSIT Conference*, pp. 188–192.
13. Dozorskyi, V., Dediv, L. and Khvostivskyi, M. (2021), «Methods of stochastic modeling in biomedical engineering», *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotechnika*, pp. 56–64.

Гринюк Іван Олександрович – аспірант кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

<https://orcid.org/0009-0002-6204-8707>.

Наукові інтереси:

- біомедична інженерія;
- медична інформатика;
- обробка сигналів;
- медичні зображення;
- медична діагностика.

E-mail: yavorska@tntu.edu.ua.

Hryniuk I.O.

**Development and experimental study of a digital tool for enhancing image quality
in introscopy medical diagnostic systems**

The article presents the architecture and operational principle of a digital software module for enhancing image quality in introscopy visualization systems. The proposed module implements a hybrid approach based on wavelet decomposition, adaptive local contrast enhancement, and bilateral smoothing. The module was integrated with a simulated endoscopic video stream and validated using open datasets of real gastrointestinal images. The results demonstrated improvements in visual clarity and diagnostic informativeness, as confirmed by expert assessments and objective metrics (PSNR, SSIM, NIQE). The practical significance of the development lies in its applicability to diagnostic systems to increase the accuracy of clinical conclusions.

Keywords: biomedical engineering; medical informatics; signal processing; medical imaging; medical diagnostics.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2025.