

ВІДГУК

ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора

Наконечного Володимира Сергійовича

на дисертаційну роботу Ревви Кирила Віталійовича

**«Методи кодування відеопотоку з компенсацією руху динамічних об'єктів
для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних
мереж»**

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації

1. Актуальність теми дослідження.

Розвиток інфокомунікаційних мереж супроводжується постійним зростанням потреби у підвищенні якості надання відеоінформаційних послуг. Ця потреба зумовлена використанням штучного інтелекту в системах аналізу та прийняття рішень, а також розвитком робототехніки і технологій комп'ютерного зору. Відповідно зростають вимоги до розподільної здатності відеокадрів, що спричиняє значне зростання інтенсивності відеопотоку. Водночас пропускна здатність бездротових каналів зв'язку залишається обмеженою, а в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій виникають значні ризики втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. Через це виникає дисбаланс між інтенсивністю відеопотоку та швидкістю його передавання, значущість якого проявляється вже з формату відеокадру 4K.

Для зниження інтенсивності відеопотоку застосовують системи стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів. Одним з ключових етапів таких систем є ентропійне кодування прогнозно-залишкових блоків, яке усуває їхню статистичну надмірність. Однак спектральному простору прогнозно-залишкових блоків притаманна також структурна надмірність. Цю надмірність можливо додатково скоротити за рахунок врахування наявних структурних

патернів, які зберігаються навіть для блоків з обмеженим статистичним характером.

Оснoву запропонованого рішення становить структурно-зумовлене позиційне кодування транс-діагональних послідовностей у нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору.

У дисертації розроблено метод кодування прогнозно-залишкових блоків, який забезпечує ентропійне кодування на зазначеному етапі. Цей метод спирається на структурування спектрального простору на етапі квантування за умовою неоднорідності першого порядку, математичне оцінювання рівня інформативності блоків та реконструкцію структурованих трансформант без внесення втрат цілісності. Тому постає актуальна науково-прикладна задача зниження інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Провідним методом ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків є двійкове цілочисельне арифметичне кодування САВАС. Проте його ефективність знижується для блоків підвищеного рівня інформативності, у яких послаблюються характерні статистичні ознаки. Причинами є зміст інформації про об'єкти інтересу, неточність формування прогнозних оцінок та компенсації руху об'єктів, наявність динаміки зміни масштабу і обмеженість продуктивності бортових обчислювальних комплексів. Тому для таких блоків доцільно застосовувати кодування, побудоване на структурних, а не статистичних властивостях спектрального простору.

Ефективність розробленого методу підтверджено його порівнянням з методом САВАС, за якого досягається перевага за рівнем стиснення прогнозно-залишкових блоків при збереженні заданого рівня цілісності відеоданих. Це створює умови для зниження інтенсивності відеопотоку та відновлення балансу зі швидкістю передавання даних в інфокомунікаційних мережах.

Таким чином, дисертаційна робота Ревви Кирила Віталійовича на тему «Методи кодування відеопотоку з компенсацію руху динамічних об'єктів для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж» є актуальною.

2. Ступінь обґрунтованості наукових досліджень, висновків і рекомендацій.

Сформульовані у дисертації наукові результати спираються на ґрунтовне опрацювання сучасного стану теорії та практики стиснення відеоданих. Автор урахував доробок вітчизняних і закордонних дослідників у галузі цифрового опрацювання сигналів, теорії інформації та кодування.

Обраний методичний апарат відповідає поставленим завданням і охоплює кілька напрямів. Продуктивність інфокомунікаційних мереж досліджено засобами моделювання та проектування телекомунікаційних систем. Зв'язок складності відео блоку з його статистичними властивостями встановлено методами статистичного аналізу. Особливості спектрального простору прогнозно-залишкових блоків розкрито через цифрове опрацювання сигналів і спектральний аналіз. Методи структурно-зумовленого кодування і декодування побудовано в межах теорії усічено-позиційних кодових систем. Кількісні оцінки одержано експериментально на створеній програмній моделі. У сукупності застосовані методи забезпечують належний науковий рівень одержаних результатів.

Ступінь достовірності сформульованих у роботі результатів підкріплено кількома незалежними чинниками. Оцінки коефіцієнта стиснення та інтенсивності відеопотоку узгоджуються між математичними моделями та експериментами на реалістичних відеопотоках. Процес відновлення прогнозно-залишкових блоків узгоджено з етапами стандартизованого відновлення відеокадрів. Аналіз відновлених кадрів засвідчує відсутність значимих спотворень у режимах допустимої цілісності. Розроблення методів кодування та відновлення спирається на коректне застосування апарату усічено-позиційних кодових систем.

За структурою робота охоплює анотацію, вступ, чотири розділи з висновками, загальні висновки, перелік джерел посилання та додатки. Матеріал побудовано послідовно: завдання дослідження узгоджені з висновками, які впливають зі змісту основної частини.

У вступній частині визначено мету та науково-прикладну задачу, окреслено наукову і практичну цінність одержаних результатів, а також подано відомості про їх апробацію та публікації здобувача.

У першому розділі обґрунтовано необхідність для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж засобами стиснення з компенсацією руху. Автор аналізує чинники, які за воєнного стану та надзвичайних ситуацій можуть додатково знижувати ефективність таких мереж. Далі виявляється суперечність між зростанням інтенсивності відеопотоку та обмеженою швидкістю його передавання. Серед сучасних систем стиснення обґрунтовано вибір HEVC як найприйнятнішої в тому числі для бортових обчислювальних засобів. Показано, що один з ключових для цієї системи є етап ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків у квантовано-спектральному просторі. Автор зазначає які обмеження має стандартизований підхід, це служить обґрунтуванням необхідності використовувати нові підходи. А саме: напрямок врахування наявних структурних патернів в спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків. На цій підставі означено мету дисертаційного дослідження, яка полягає у розробці методу кодування прогнозно-залишкових блоків в системах стиснення з компенсацією руху об'єктів для зниження інтенсивності відеопотоку та для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж на основі врахування структурно-спектральних патернів.

Другий розділ обґрунтовує обмеження, притаманні стандартизованій технології HEVC. Тут доводиться, що подання трансформанти в нерівномірно-діагональному форматі відкриває можливість опрацювати структурно-комбінаторну надмірність. Автор пропонує спосіб виявлення стійких спектрально-структурних патернів транс-діагональних послідовностей на етапі квантування. Обґрунтовано чому умовою такого виявлення слугує неоднорідність першого порядку між суміжними квант-компонентами. Далі будується математична модель, що оцінює кількість інформації у послідовностях структурованого спектрального простору. Завершує розділ

побудова методу структурно-зумовленого позиційного кодування прогнозно-залишкових блоків.

Третій розділ обґрунтовує та вибудовує зворотний бік технології – відновлення послідовностей у структурованому спектральному просторі. Спершу формується методологія зворотних функціональних перетворень для реконструкції транс-діагоналей. На її основі обґрунтовуються та закладаються теоретичні засади декодування структурно-зумовлених позиційних чисел. Автор виводить співвідношення, що визначає поточне кодове значення за початковим кодом і вагою старшого елемента. Це дає змогу відновлювати елементи незалежно, за їх довільним розташуванням у числі. Окремо запропоновано спосіб узгодження такого відновлення з етапами стандартної реконструкції відеокадрів.

Четвертий розділ відведено порівняльному оцінюванню ефективності стиснення для систем з компенсацією руху. Автор обґрунтовує та формує методологію такого оцінювання, а також інформаційну модель для визначення обсягу бітового опису компактного синтаксису. Далі на програмній моделі проводиться порівняння розробленого методу структурно-зумовленого позиційного кодування з двійковим цілочисельним арифметичним кодуванням САВАС. Проведено порівняння рівня стиснення окремих блоків і відеокадрів, а також вплив методу на ефективність функціонування інфокомунікаційних мереж. Результати порівняння доводять ефективність розробленого методу виражену у зниженні інтенсивності відео потоку в середньому від 9% до 17%. Достовірність одержаних оцінок підкріплено відомим математичним апаратом та застосуванням стандартизованих показників цілісності.

3. Достовірність та новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є достовірними. Їх достовірність спирається на використання результатів наукових досліджень вітчизняних і закордонних учених, опрацьованих у переліку джерел посилання зі 161 найменування. Теоретичні побудови виконано із застосуванням апробованого апарату цифрового

опрацювання сигналів, теорії інформації та кодування, комбінаторного аналізу й усіченого позиційного кодування. Однозначність кодування та відновлення прогнозно-залишкових блоків доведено аналітично. Розрахункові оцінки узгоджуються з експериментальними даними, одержаними на розробленій програмній моделі, а цілісність відновлених відеокадрів оцінено за стандартизованими показниками PSNR та SSIM. Практичну достовірність розробленого методу засвідчено актами реалізації результатів науково-прикладних досліджень у ТОВ «ЮНЕЙ ДЕФЕНС» (акт від 19.11.2025 р.) та ТОВ «Одеський авіаційний завод» (акт від 04.10.2025 р.).

Одержані здобувачем наукові результати полягають у такому:

1. Вперше створено метод структурування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків на основі квантування. Це забезпечує створення умов для додаткового скорочення структурної надмірності в умовах збереження рівня семантичної цілісності інформації (в умовах компенсації квантових спотворень).

2. Вперше створено математичну модель щодо визначення рівня інформативності прогнозно-залишкових блоків на основі структурування їх спектрального простору. Це дозволяє здійснювати контроль балансу між рівнем бітового об'єму та рівнем цілісності відновлених відео блоків.

3. Вперше створено метод структурно-зумовленого кодування прогнозно-залишкових блоків в спектральному просторі на основі усічено-позиційних кодових систем. Це дозволяє підвищити рівень стиснення без внесення втрат цілісності відео блоків в системах кодування з компенсацією руху динамічних об'єктів.

4. Вперше створена система вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елементу структурно-зумовленого позиційного числа. Це забезпечує умову для незалежного відновлення елементів структурно-зумовлених позиційних чисел.

5. Вперше створено метод відновлення елементів блокового коду на основі використання властивостей структурно-зумовленого позиційного

базису. Це дозволяє створити умови для реконструкції структурованих трансформант прогнозно залишкових блоків в умовах збереження потрібного рівня цілісності інформації

4. Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Здобувач отримав усі наукові результати роботи самостійно. У спільних зі співавторами публікаціях до дисертації залучено лише ті ідеї та положення, авторство яких належить здобувачеві. Матеріали дисертації представлено в 14 наукових працях, де відображено як основні результати дослідження, так і всі положення його наукової новизни. Серед цих праць – 6 статей: 1 опубліковано у виданні, що індексується базою Web of Science, 5 – у фахових виданнях України категорії «Б». Ще 8 праць становлять тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях IEEE, матеріали яких індексуються базою Scopus.

5. Значущість дослідження для науки і практики та шляхи його використання.

Теоретичне значення результатів дослідження полягає в обґрунтуванні нового підходу до зниження інтенсивності відеопотоку на основі структурно-зумовленого позиційного кодування прогнозно-залишкових блоків. Одержані результати розвивають теоретичні засади методів кодування в системах стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів. Прикладне значення роботи полягає у можливості вбудовування розроблених методів кодування та відновлення прогнозно-залишкових блоків до систем стиснення з компенсацією руху. Такі методи застосовуються у складі програмного забезпечення безпілотних літальних апаратів, та роботизованих комплексів.

Порівняно зі стандартизованим методом CABAC розроблений метод забезпечує перевагу за рівнем стиснення прогнозно-залишкових блоків, а саме:

– від 20 до 27 % за цілісності з показниками PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99;

– від 25 до 30 % для інформативних блоків за цілісності з показниками PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95.

У разі інтегрування методу до кодування опорних відеокадрів перевага становить від 20 до 25 %, а для передбачених відеокадрів — від 15 до 20 % залежно від рівня забезпечення їх цілісності.

Наслідком є зменшення інтенсивності відеопотоку в межах заданого рівня цілісності:

- у середньому на 10 % за показників PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99;

- у середньому на 17 % за показників PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

- у середньому на 9 % за показників PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77.

Розроблений метод створює умови для передавання відеопотоків у реальному часі з частотою 30 кадрів/с для форматів від HD до 4K за різних значень швидкості інфокомунікаційних мереж. Він також дає змогу збільшити частоту кадрів на 10 одиниць за цілісності з показниками PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95. Додатково забезпечується можливість застосування більш енергоефективних каналів передавання даних та зменшення витрат на розгортання інфокомунікаційних мереж для організації відеообміну.

Дисертацію виконано відповідно до планів науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки у межах науково-дослідної роботи «Розроблення методів і засобів обробки ансамблю сигналів і розпізнавання радіо-випромінюючих джерел та об'єктів в умовах апіорної невизначеності» (ДРН №0119U001406), у якій здобувач був виконавцем. Практичне значення результатів підтверджено їх апробацією на міжнародних науково-технічних конференціях IEEE та впровадженням у діяльність двох підприємств. Відповідні акти реалізації наведено у додатках до дисертації.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

Опрацювання тексту дисертації та наукових публікацій Ревви К.В., що відображають основні результати роботи, свідчить про додержання здобувачем принципів і норм академічної доброчесності. У кожному випадку використання чужих ідей, розробок, тверджень чи відомостей наведено покликання на

відповідне джерело. Оформлення запозичень узгоджується з вимогами законодавства України про авторське право та суміжні права.

7. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертаційної роботи і її окремих положень.

Ознайомлення з дисертацією підтверджує високий рівень опрацювання теми на теоретичному, методичному та прикладному рівнях. Поставлену мету досягнуто, а сформульовані завдання розв'язано повною мірою. Виклад вирізняється логічною стрункістю, науковим стилем, а оформлення роботи відповідає встановленим вимогам.

Позитивно оцінюючи одержані Реввою К.В. наукові та практичні результати, наведу водночас окремі дискусійні положення й побажання щодо змісту роботи.

1. В дисертації систему стиснення HEVC обрано як найбільш сумісну з можливостями бортових обчислювальних засобів. Але не вистачає обґрунтування чому не обрали іншу систему, наприклад VVC? Це надало б більш ґрунтовності щодо гнучкості створених методів до інтегрування в сучасних технологіях.

2. В дисертаційній роботі представлено, що основним напрямком практичного застосування розроблених методів є інтегрування до комплексів БПЛА. Однак в дисертації не достатньо розкрито вимоги щодо бортових ресурсів (енергоємність, обчислювальні можливості, наявність програмної та апаратної підтримки) для можливості інтегрування створених методів.

3. Створений в дисертації базовий метод кодування спирається на визначення вагових коефіцієнтів. Цей етап є одним з енергоємних. Але в дисертації не повністю розкрито питання щодо впливу складності такої обробки на часові затримки в процесі доставки відеоданих з використанням розроблених процесів стиснення.

4. В процесі оцінювання ефективності створених в дисертації методів розглядався варіант обробки повно-кольорових відеозображень з 8-бітною оцифровкою пікселів. Однак з боку можливостей подальшого практичного масштабування створених методів було б краще додатково оцінити варіант

обробки відеозображень з більшим рівнем оцифровки (10 – 16 біт/піксель). До речі такі варіанти вже є користувацьким стандартом, для потокових сервісів (Netflix, YouTube), ігрових консолях та ПК, медичної візуалізації (КТ, цифрова рентгенографія) та промислових камерах.

5. В дисертації розглядається можливість використання створених методів різних варіантів суб-дискретизації компонент моделі YCbCr, наприклад формати: 4:4:4, 4:2:2, 4:2:0, 4:0:0. Однак остаточного висновку щодо переваги одного з форматів на загальну ефективність доставки відеоданих в дисертації не зроблено.

Проте, наведені зауваження мають дискусійний характер і не впливають на загалом високу оцінку дисертаційного дослідження. Досягнення поставленої мети та вирішення всіх завдань дослідження засвідчують вагомий особистий внесок автора у розвиток методів кодування прогнозно-залишкових блоків для систем стиснення з компенсацією руху та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

8. Загальна оцінка роботи, її відповідність встановленим вимогам.

Дисертація Ревви Кирила Віталійовича становить завершене й самостійно виконане наукове дослідження, здійснене на належному науково-технічному рівні з послідовним і доступним викладенням матеріалу.

У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, що полягає у зниженні інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

З огляду на актуальність теми, наукову новизну, вагомість, обґрунтованість і достовірність одержаних результатів, а також практичну значущість сформульованих положень і висновків, є підстави стверджувати, що подана дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пунктів 6-9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 № 44 (зі змінами) та вимогам до

оформлення дисертації, що затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40.

Таким чином, вважаю, що здобувач, Ревва Кирило Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктор філософії в галузі 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент:

Професор кафедри кібербезпеки
та захисту інформації Київського
національного університету
імені Тараса Шевченка

д.т.н., професор
19 серпня 2026 р.



Володимир НАКОНЕЧНИЙ