

ВІДГУК

Офіційного опонента кандидата фізико-математичних наук, доцента
Макарічева Віктора Олександровича на дисертаційну роботу Ревви Кирила
Віталійовича **«Методи кодування відеопотоку з компенсацію 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.

Надійшла робота інфокомунікаційних мереж прямо позначається на обороноздатності держави, стані її науки й технологій та економічному розвитку. Попит на відео в цих мережах невідомо зростає, і його підживлюють інтелектуальні засоби аналізу та ухвалення рішень, роботизовані комплекси й системи машинного зору, для яких деталізація зображення є критичною. Кожен крок до вищої розподільної здатності та частоти кадрів підвищує інтенсивність відеопотоку, тимчасом як бездротові канали, особливо за воєнного стану та надзвичайних ситуацій, мають значні ризики втрати ефективності, а їх розвиток уповільнений. Саме цей розрив і породжує дисбаланс між інтенсивністю відеопотоку та швидкістю передавання, за якого відео не вдається доставити в реальному часі без втрати заданої цілісності. Тому актуальною є науково-прикладна задача зниження інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Передавання відеоінформації в умовах обмеженої пропускну здатності каналів вимагає застосування ефективних систем стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів, реалізованих у платформах HEVC та VVC. Ключовим етапом кодування прогнозно-залишкових блоків у таких системах є усунення статистичної надлишковості методом двійкового цілочисельного арифметичного кодування CABAC. Однак прогнозно-залишкові блоки підвищеного рівня інформативності характеризуються також структурно-

комбінаторною надлишковістю спектрального простору. Арифметичне кодування, результативність якого спирається на статистичну впорядкованість даних, цієї надлишковості не усуває. Тому для ефективного стиснення таких блоків у роботі запропоновано альтернативний метод їх кодування у спектральному просторі на основі врахування наявних структурних патернів. У роботі обґрунтовано метод встановлення стійких структурних патернів квантованих трансформант за умовою неоднорідності першого порядку. Запропоновано опрацювання транс-діагональних послідовностей у нерівномірно-діагональному форматі та математичну модель оцінювання рівня інформативності блоків. Унаслідок структурно-зумовленого позиційного кодування цих послідовностей досягнуто скорочення структурної надмірності та зниження інтенсивності відеопотоку без втрат цілісності.

З вище зазначеного маю заключити, що дисертаційна робота Ревви Кирила Віталійовича на тему «Методи кодування відеопотоку з компенсацією руху динамічних об'єктів для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж», що включає встановлення структурних патернів, математичну модель оцінювання інформативності та структурно-зумовлене позиційне кодування прогнозно-залишкових блоків, є актуальною та перспективною.

2. Ступінь обґрунтованості наукових досліджень, висновків і рекомендацій.

Опрацювання поданої дисертації Ревви К.В. переконує в достовірності та обґрунтованості викладених у ній наукових положень, висновків і рекомендацій. Коло питань, окреслене темою, розкрито в роботі з належною повнотою.

Обґрунтованість одержаних результатів забезпечена коректним застосуванням наукового апарату, що відповідає предмету дослідження: теоретичних засад моделювання й проектування телекомунікаційних систем, методів статистичної обробки та інтелектуального аналізу, цифрового опрацювання сигналів і спектрального аналізу, теорії інформації та кодування, а також теоретичної бази усіченого позиційного кодування. Достовірність

висновків підтверджують оприлюднення результатів на міжнародних наукових конференціях та їх упровадження на підприємствах, засвідчене відповідними актами. Автор докладно дослідив квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків, його структурування та кодування транс-діагональних послідовностей.

Роботу побудовано на власних результатах автора та на суттєвому масиві опрацьованих джерел (161 найменування); зібрано й проаналізовано значний обсяг експериментальних даних, одержаних за допомогою розробленої програмної моделі. Науковий і методичний рівень дисертації відповідає чинним вимогам, а її назва точно передає зміст. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Вступ містить формулювання мети та науково-прикладної задачі, аргументацію актуальності теми й окреслення проблематики, що зводиться до дисбалансу між інтенсивністю відеопотоку та швидкістю передавання бездротових мереж; тут же вміщено відомості про наукову й практичну цінність, апробацію та публікації здобувача.

Перший розділ наголошує на тенденції зростання інтенсивності відеопотоку в інфокомунікаційних мережах. Обґрунтовано потребу підвищення ефективності їх функціонування за обмеженої пропускну здатності бездротових каналів. Виявлене протиріччя між інтенсивністю кодованого відеопотоку з потрібним рівнем цілісності й розподільної здатності та швидкістю передавання найпоширеніших бездротових мереж. Окреслено вимоги до перспективних методів, здатних знизити інтенсивність відеопотоку без втрат цілісності. Проаналізовано два напрями вдосконалення систем стиснення та обґрунтовано вибір підходу, який спирається на врахування структурних патернів спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Сформульовано мету дослідження – розробка 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 представляє детальне дослідження обмежень технології HEVC, що постають з недосконалості прогнозних моделей, точності визначення векторів руху та можливостей арифметичного кодування. Виявлено можливість вилучення додаткової структурно-комбінаторної надмірності за подання трансформанти в нерівномірно-діагональному форматі. Виявлено залежність структурних патернів квантованих трансформант від рівня інформативності блоку. Запропоновано метод формування стійких структурно-спектральних патернів транс-діагональних послідовностей за умовою неоднорідності першого порядку. Побудовано математичну модель оцінювання кількості інформації для нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору. Розроблено метод структурно-зумовленого позиційного кодування, що реалізує базовий етап функціональних перетворень для компактного опису блоку.

Третій розділ присвячено методу реконструкції послідовностей у структурованому спектральному просторі на основі зворотних функціональних перетворень для відновлення транс-діагоналей. Викладено теоретичні засади декодування кодових значень структурно-зумовлених позиційних чисел. Одержано аналітичне співвідношення для безпосереднього визначення поточного кодового значення за початковим кодом і вагою старшого елемента. Представлено метод самостійного відновлення елементів за довільною позицією в позиційному числі. Розроблено спосіб узгодження реконструкції прогнозно-залишкових блоків з етапами стандартизованого відновлення відеокадрів.

Четвертий розділ містить оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів. Побудовано інформаційну модель для визначення обсягу бітового опису компактного синтаксису. Проведено порівняльне дослідження блоків і кадрів різної інформативності, оброблених запропонованим структурно-зумовленим позиційним кодуванням та арифметичним кодуванням CABAC, за рівнем стиснення й зниженням інтенсивності відеопотоку за збереження заданої цілісності. Підтверджено перевагу розробленого методу.

Висновки дисертації логічно постають із матеріалів наукового дослідження й адекватно відображають його результати.

Додатки містять відомості про впровадження результатів дослідження, перелік публікацій здобувача та приклади відновлених відеокадрів у складі відеогрупи.

Анотацію подано українською та англійською мовами; вона є узагальненим стислим викладом основного змісту дисертації, у якому окреслено одержані результати, зазначено наукову новизну та охарактеризовано практичне значення роботи. Текст дисертації та анотацію оформлено згідно з вимогами МОН України.

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

Достовірність одержаних результатів забезпечується коректним застосуванням апарату усічено-позиційних кодових систем і теорії інформації, доведеною однозначністю прямих та зворотних перетворень, за якої запропоноване кодування власних втрат не вносить, а спотворення локалізовано на стандартизованому етапі квантування, узгодженістю аналітичних оцінок обсягу компактного синтаксису з експериментальними даними програмної моделі. В результаті роботи автор сформував наукову новизну дисертаційного дослідження, а саме:

1. Створено метод структурування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків на основі квантування. Відмінності методу стосуються того, що процес дискретизації спектрального простору здійснюється шляхом двокомпонентного інформативного на основі додаткового врахування інформації щодо стану попереднього елементу діагоналі та початкового значення поточного елементу з побудовою позиційних послідовностей із неоднорідностями першого порядку. Це забезпечує створення умов для додаткового скорочення структурної надмірності в умовах збереження рівня семантичної цілісності інформації (в умовах компенсації квантових спотворень).

2. Створено математичну модель щодо визначення рівня інформативності прогнозно-залишкових блоків на основі структурування їх спектрального простору. Відмінності моделі стосуються того, що: визначення кількості допустимих станів транс-діагоналей знаходиться за одночасним обліком неоднорідностей першого порядку та психовізуально-спустошених властивостей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору. Це дозволяє здійснювати контроль балансу між рівнем бітового об'єму та рівнем цілісності відновлених відео блоків.

3. Створено метод структурно-зумовленого кодування прогнозно-залишкових блоків в спектральному просторі на основі усічено-позиційних кодових систем. Відмінності методу стосуються: використання технології утворення інформативно-позиційної ваги для квант-компонент транс-діагоналі прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі з врахуванням його нерівномірно-координатного формату в структурно-зумовленому позиційному просторі. Це дозволяє підвищити рівень стиснення без внесення втрат цілісності відео блоків в системах кодування з компенсацією руху динамічних об'єктів

4. Створена системи вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елементу структурно-зумовленого позиційного числа. Відмінність полягає у застосуванні співвідношення щодо наближеного оцінювання кодового значення. Це забезпечує умову для незалежного відновлення елементів структурно-зумовлених позиційних чисел.

5. Створено метод відновлення елементів блокового коду на основі використання властивостей структурно-зумовленого позиційного базису. Відмінності методу стосуються незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення. 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.

Положення, висновки та рекомендації дисертації дістали належну апробацію: вони достатньо повно відображені у публікаціях автора та обговорені на наукових конференціях. Результати дослідження оприлюднено у 14 наукових працях, серед яких: 1 стаття опублікована у науково-технічному журналі, який включений до міжнародної наукометричної бази Web of Science; 5 статей в наукових журналах, які включені в «Перелік наукових фахових видань України» та мають категорію Б. Апробація результатів дисертації відображена у 8 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, які проводяться міжнародною організацією IEEE. Ознайомлення з науковими публікаціями здобувача дає підстави стверджувати, що висвітлені в них наукові положення мають прикладну цінність і засвідчують високий рівень самостійності виконаної ним роботи.

Перелік та вивчення змісту опублікованих статей дозволяє вважати виконаними положення п. 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженому Постановою КМУ від 12 січня 2022 року № 44.

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

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що інтеграція розроблених методів кодування та декодування прогнозно-залишкових блоків у системи стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів підвищує ефективність функціонування інфокомунікаційних мереж і придатна до застосування в мобільних сенсорних платформах та роботизованих комплексах.

Основні результати роботи впроваджено у ТОВ «Одеський авіаційний завод», де в підсистемах обробки та передавання інформації застосування розроблених методів забезпечило підвищення рівня стиснення відеокадрів у середньому на 21 % за достовірності не менш ніж 30 дБ та передавання в

реальному часі з підвищенням деталізуючої спроможності в середньому на 43 % (акт від 04.10.2025), а також у ТОВ «ЮНЕЙ ДЕФЕНС», де в автоматизованій системі відображення інформації впровадження методу кодування та відновлення нерівномірних діагональних послідовностей забезпечило перевагу за коефіцієнтом компресії відносно наявних методів на рівні 10–15 % (акт від 19.11.2025). А також, результати впроваджено під час виконання науково-дослідної роботи «Розроблення методів і засобів обробки ансамблю сигналів і розпізнавання радіовипромінюючих джерел та об'єктів в умовах апіорної невизначеності» (№ 0119U001406), у якій автор був виконавцем.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

Вивчення тексту дисертації та наукових публікацій Ревви К.В., у яких відображено основні результати дослідження, дає підстави для висновку про дотримання автором принципів і норм академічної доброчесності. У кожному випадку запозичення ідей, розробок, тверджень чи відомостей робота містить відповідні посилання на джерела; вимоги законодавства про авторське право та суміжні права дотримано.

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

Комплексне вивчення змісту дисертації, а також перевірка викладених теоретичних положень і науково-прикладних розробок дають підстави оцінити роботу позитивно. Дисертація вирізняється логічною завершеністю та структурною цілісністю, а одержані результати узгоджуються із заявленими метою й завданнями. Виклад відповідає нормам літературної української мови та вимогам академічного стилю.

Позитивно оцінюючи наукову новизну та практичну значущість здобутків Ревви К.В., вважаю за необхідне звернути увагу на низку дискусійних положень, які не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, проте потребують додаткового пояснення, а саме:

1. У дисертації порівняльне оцінювання ефективності стиснення виконано для відеокадрів форматів HD (720p), Full HD (1080p), 4K Ultra HD HV, 4K UHD. Однак системи повітряного спостереження, аерофотозйомки та

машинного зору дедалі частіше працюють у форматах 8K і більше. З огляду на подальше практичне масштабування створених методів було б доцільно додатково оцінити, як збільшення розміру роздільної здатності кадру позначається на частці блоків підвищеної інформативності та на досягнутому рівні стиснення.

2. В обґрунтуванні актуальності теми зазначено зростання ролі інтелектуальних засобів аналізу відеоінформації. Водночас питання поєднання створених методів структурно-зумовленого кодування з підходами на основі машинного навчання, які активно розвиваються в задачах стиснення відеоданих, у роботі не розглянуто. Окреслення перспектив такого поєднання посилило б уявлення про подальші напрями розвитку одержаних результатів.

3. У роботі рівень цілісності відновлених відеоданих оцінюється за показниками PSNR та SSIM. Такі показники орієнтовані на особливості зорового сприйняття людини. Однак не враховані показники mAP, IoU, MOTA, які також використовуються для оцінювання якості інформації в системах машинного зору.

4. У методології оцінювання (підрозділ 4.1) розрізняються відеокадри I-, P- та B-класів. Однак в дисертації не розписано оцінку впливу на рівень стиснення та цілісність відеопотоку різних типів кадру у разі застосування до їх кодування розроблених методів.

5. У переліку використаних джерел наведено праці, присвячені метриці VMAF [71], [117], яка нині широко застосовується для оцінювання сприйманої якості відеоданих. Проте в експериментальній частині оцінювання рівня цілісності обмежено показниками PSNR та SSIM. Залучення додаткової метрики цього класу підсилило б обґрунтованість висновків щодо збереження цілісності відновлених відеокадрів.

6. На стор. 57 у поясненні до формули (2.2) сказано, що значення функції квантування визначається згідно з обраною стратегією та відповідним параметром візуальної якості. Однак діапазон значень цього параметра та його зв'язок зі стандартизованим параметром квантування платформи не

конкретизовано. Уточнення цього спростило б розуміння умов проведення експериментальних досліджень.

8. Загальна оцінка роботи, її відповідність встановленим вимогам.

Дисертаційна робота Ревви Кирила Віталійовича є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому запропоновано нові теоретичні, методичні та практичні підходи до розв'язання актуального наукового завдання.

Темі дисертації розкрито повністю, поставлені завдання виконано, мету дослідження досягнуто, а одержані нові наукові результати мають теоретичне значення та практичну цінність; повнота їх відображення в опублікованих працях засвідчує самостійність автора й високий рівень виконаного дослідження.

З огляду на актуальність, наукову новизну, вагомість здобутих результатів, ступінь їх обґрунтованості та достовірності, а також практичну значущість сформульованих положень і висновків можна 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:

Доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій
ім. О.О. Зеленського національного аерокосмічного університету "Харківський
авіаційний інститут"

к.ф.-м.н., доцент

Віктор МАКАРІЧЕВ