

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РЕВВА КИРИЛО ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.327: 681.5

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ КОДУВАННЯ ВІДЕОПОТОКУ З КОМПЕНСАЦІЮ РУХУ
ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

172 – Телекомунікації та радіотехніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

К.В. РЕВВА

Науковий керівник
Бараннік Володимир Вікторович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2026 рік

АНОТАЦІЯ

Ревва К.В. Методи кодування відеопотоку з компенсацією руху динамічних об'єктів для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2026.

У дисертаційній роботі вирішена **науково-прикладна задача**, яка стосується зниження інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Розроблено метод кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування. В процесі стиснення додатково враховуються стійкі патерні структурного походження в спектральному просторі стосовно обмеженості розмаху зміни значень квант-компонент транс-діагоналей та виконання умови неоднорідності першого порядку. Це забезпечує додаткове зниження інтенсивності відеопотоку та забезпечує баланс з швидкістю передачі даних в інфокомунікаційних мережах без втрат цілісності.

Обґрунтовується можливість підвищення ефективності систем стиснення з компенсацією руху на основі розробки методів кодування прогнозно-залишкових блоків з використанням усічено-позиційних базисів.

Розробляється метод встановлення стійких спектрально-структурних патернів для транс-діагональних послідовностей в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Це дозволяє створити умову для підвищення рівня стиснення відео блоків без втрат цілісності. Метод забезпечує досягнення умови неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей в процесі квантування на основі аналізу інформації за двома компонентами: квант-компоненти, що

передусе поточні у транс-діагоналі; перед-квантове значення поточної компоненти транс-діагоналі. При цьому враховується нерівномірно-діагональний формат індексації спектрального простору прогнозно-залишкових блоків.

Створюється математична модель для оцінювання кількості інформації в послідовностях нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Показується, що модель дозволяє врахувати наступні особливості систем стиснення з компенсацією руху: трансформанта будується для прогнозно-залишкових блоків в режимах Intra та Inter передбачення з використанням дискретного косинусного перетворення; для ПЗ-блоку в процесі квантування його спектрального простору забезпечується наявність стійкого структурно-спектрального патерну щодо неоднорідності першого порядку для структурованих квант-компонент транс-діагоналей; для значень квант-компонент транс-діагоналей виконується обмеження на діапазон можливих значень в залежності від їх позиції з врахуванням умови неоднорідності першого порядку; визначення кількості інформації в ПЗ-блоці у *структурованому* спектральному просторі визначається з врахуванням рівня інформативності окремих транс-діагоналей.

Розробляється метод структурно-зумовленого позиційного кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкового блоку. Це створює реалізацію базового етапу загальних функціональних перетворень щодо побудови компактного опису в системі стиснення з компенсацією руху об'єктів.

Створюється теоретична база для побудови методу декодування кодових значень структурно-зумовлених позиційних чисел зважанням комбінаторної конфігурації трансформанти за пірамідальною текстурою. Вона включає до себе дві основні складові. Перша складова - система вирішального правила для визначення адитивної інформативно-позиційної

ваги, яка включає значення поточного старшого елемента SBP-числа. В основі чого лежать: математичне співвідношення для наближеного оцінювання кодового значення SBP-числа відносно його адитивних складових за старшим елементом; властивості позиційного базису, які дозволяють наближено встановити нижню та верхню межі зміни кодового значення в структурно-зумовленому позиційному просторі. Друга складова - вирішальне правило для вилучення поточного старшого елемента SBP-числа з відповідного інформативно-позиційного базису. В основі правила лежить синтезована функціональна залежність значення поточного старшого елемента SBP-числа від його ваги та поточного кодового значення. Синтез стосується нормалізації співвідношення для наближеного оцінювання поточного кодового значення та послідуєчого виключення ваги поточного старшого елемента SBP-числа.

Розробляється метод незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення. Даний метод базується на використанні системи вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елемента SBP-числа з використанням співвідношення щодо наближеного оцінювання кодового значення.

Будується інформаційна модель для оцінювання об'єму бітового опису компактного синтаксису для розробленого методу. При цьому обліковуються властивості комбінаторної конфігурації структурованої трансформанти ПЗ-блоку в нерівномірно-діагональному форматі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування.

В результаті проведених експериментальних досліджень обґрунтовано перевага інтеграції до систем стиснення з компенсацією руху створеного методу кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі для зниженні інтенсивності відеопотоку та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Наукова новизна основних результатів досліджень.

1. *Вперше* 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. *Вперше* 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. *Вперше* 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. *Вперше* створена система 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. *Вперше* 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 ПЗ-блоків в умовах збереження потрібного рівня цілісності інформації.

Практичне значення отриманих результатів досліджень. Інтеграція розроблених методів кодування та декодування прогнозно-залишкових блоків в системи стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів забезпечує перевагу у підвищенні ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. Це стосується наступного:

1. Досягається перевага за рівнем стиснення відносно стандартизованої технології кодування САВАС у разі обробки відео-блоків та за умов їх інтеграції у відеокадрах.

2. Забезпечується перевага за рівнем зменшення інтенсивності відеопотоку. Відповідно створюються умови для: передачі в реальному часі відео потоків з потрібною частотою відеокадрів та збільшеною розподільною здатністю; одночасного збільшення частоти кадрів в умовах передачі реального часу та рівня цілісності; використання більш енерго-ефективних каналів передачі даних. Це наприклад, є важною вимогою для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних платформ та роботизованих комплексів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА, дрон), інформаційна ентропія; нейронна мережа; відеозображення, інформаційна безпека, стиснення, розподілені обчислення, інфокомунікаційна система, трансформанта, прогнозно-залишковий блок, структурно-зумовлене позиційне кодування, вектор руху, транс-діагональ.

ABSTRACT

Revva K.V. Methods of Video Stream Coding with Motion Compensation of Dynamic Objects for Improving the Efficiency of Infocommunication Networks Operation. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2026.

The dissertation addresses a *scientific-applied problem* concerning the reduction of video stream intensity to ensure load balance and improve the operational efficiency of infocommunication networks.

A method is developed for coding prediction-residual blocks in a structured spectral domain based on structurally conditioned positional coding. During compression, stable patterns of structural origin in the spectral domain are additionally taken into account with respect to the bounded range of variation of quantization component values of trans-diagonals and the satisfaction of the first-order non-uniformity condition. This ensures additional reduction of video stream intensity and maintains balance with the data transmission rate in infocommunication networks without loss of data integrity.

The feasibility of enhancing the efficiency of motion-compensated compression systems is substantiated through the development of coding methods for prediction-residual blocks using truncated positional bases.

A method is developed for identifying stable spectral-structural patterns for trans-diagonal sequences during quantization of the spectral domain of prediction-

residual blocks. This creates conditions for increasing the compression level of video blocks without loss of integrity. The method achieves the first-order non-uniformity condition for trans-diagonals during quantization by analyzing information along two components: the quantization component preceding the current one in the trans-diagonal; and the pre-quantized value of the current trans-diagonal component. The non-uniform diagonal indexing format of the spectral domain of prediction-residual blocks is taken into account.

A mathematical model is developed for estimating the information content of sequences in the non-uniform diagonal format of the structured spectral domain of prediction-residual blocks. It is demonstrated that the model accounts for the following characteristics of motion-compensated compression systems: the transform is constructed for prediction-residual blocks in Intra and Inter prediction modes using the discrete cosine transform; during quantization of the spectral domain of a prediction-residual block, the presence of a stable structural-spectral pattern regarding first-order non-uniformity is ensured for the structured quantization components of trans-diagonals; constraints on the range of permissible values of quantization components of trans-diagonals are applied depending on their position, taking into account the first-order non-uniformity condition; the information content of a prediction-residual block in the *structured* spectral domain is determined with consideration of the informational significance of individual trans-diagonals.

A method of structurally conditioned positional coding of sequences in the non-uniform diagonal format of the structured spectral domain of a prediction-residual block is developed. This implements the foundational stage of general functional transformations for constructing a compact representation within a motion-compensated compression system.

A theoretical basis is established for constructing a method of decoding code values of structurally conditioned positional numbers by weighting the combinatorial configuration of the transform according to a pyramidal texture. It comprises two principal components. The first component is a decision rule system

for determining the additive informational-positional weight that includes the value of the current most significant element of the SBP-number. This is based on: a mathematical relation for approximate estimation of the code value of an SBP-number with respect to its additive components by the most significant element; and properties of the positional basis that allow approximate determination of the lower and upper bounds of variation of the code value in the structurally conditioned positional domain. The second component is a decision rule for extracting the current most significant element of the SBP-number from the corresponding informational-positional basis. The rule is founded on a synthesized functional relationship between the value of the current most significant element of the SBP-number, its weight, and the current code value. The synthesis pertains to normalizing the relation for approximate estimation of the current code value and subsequently excluding the weight of the current most significant element of the SBP-number.

A method is developed for the independent recovery of elements by their arbitrary position in the SBP-number through direct use of the initial code value. This method is based on a system of decision rules for establishing the required informational-positional weight and for directly extracting an arbitrary element of the SBP-number using the approximate code value estimation relation.

An information model is constructed for evaluating the bit volume of the compact syntax description for the developed method. The properties of the combinatorial configuration of the structured transform of the prediction-residual block in the non-uniform diagonal format based on structurally conditioned positional coding are taken into account.

The experimental studies conducted substantiate the advantage of integrating the developed method of coding prediction-residual blocks in the structured spectral domain into motion-compensated compression systems for reducing video stream intensity and improving the operational efficiency of infocommunication networks.

Scientific Novelty of the Principal Research Findings.

1. *For the first time*, a method for structuring the spectral domain of prediction-residual blocks based on quantization has been developed. The distinguishing features of the method concern the fact that the discretization of the spectral domain is carried out by means of two-component informational quantization, additionally accounting for information on the state of the preceding diagonal element and the initial value of the current element, with construction of positional sequences exhibiting first-order non-uniformities. This ensures conditions for additional reduction of structural redundancy while preserving the level of semantic data integrity (under the condition of compensation for quantization distortions).

2. *For the first time*, a mathematical model for determining the informational significance of prediction-residual blocks based on the structuring of their spectral domain has been developed. The distinguishing features of the model concern the fact that the determination of the number of permissible states of trans-diagonals is obtained by simultaneously accounting for first-order non-uniformities and psychovisually imperceptible properties in the non-uniform diagonal format of the structured spectral domain. This enables control of the balance between the bitrate level and the integrity level of the reconstructed video blocks.

3. *For the first time*, a method of structurally conditioned coding of prediction-residual blocks in the spectral domain based on truncated positional code systems has been developed. The distinguishing features of the method concern the use of a technology for forming informational-positional weights for quantization components of trans-diagonals of prediction-residual blocks in the structured spectral domain, taking into account its non-uniform coordinate format within the structurally conditioned positional domain. This enables an increase in the compression level without introducing integrity losses in video blocks within motion-compensated coding systems for dynamic objects.

4. *For the first time*, a system of decision rules has been developed for establishing the required informational-positional weight and for directly

extracting an arbitrary element of a structurally conditioned positional number. The distinguishing feature lies in the application of a relation for approximate estimation of the code value. This provides the condition for independent recovery of elements of structurally conditioned positional numbers.

5. *For the first time*, a method for recovering elements of a block code based on the properties of the structurally conditioned positional basis has been developed. The distinguishing features of the method concern the independent recovery of elements by their arbitrary position in the SBP-number through direct use of the initial code value. This enables the creation of conditions for reconstruction of structured transforms of prediction-residual blocks while preserving the required level of data integrity.

Practical Significance of the Research Findings. Integration of the developed coding and decoding methods for prediction-residual blocks into motion-compensated compression systems for dynamic objects provides advantages in improving the operational efficiency of infocommunication networks. This concerns the following:

1. A compression ratio advantage is achieved over the standardized CABAC coding technology when processing video blocks and under conditions of their integration within video frames.

2. An advantage in reducing video stream intensity is ensured. Accordingly, conditions are created for: real-time transmission of video streams at the required frame rate and increased resolution; simultaneous increase of frame rate under real-time transmission conditions and integrity level; use of more energy-efficient data transmission channels. This is, for example, an important requirement for improving the operational efficiency of mobile sensor platforms and robotic systems.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV, drone), information entropy; neural network; video image; information security; compression, distributed computing, infocommunications system, transform, prediction-residual block, structure-dependent positional coding, motion vector, trans-diagonal.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бараннік В. В. Технологія ковзного кодування нерівномірних діагональних послідовностей в двовимірному спектральному просторі трансформанти / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Ю. М. Бабенко, Р. С. Онищенко, Т. В. Белікова, О. О. Ігнат'єв // *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia*. – 2023. – № 94. – С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.94.13-23> . **Web of Science**

2. Бараннік В. В. Метод усічено-позиційного декодування трансформант за нерівномірно-діагональним форматом / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Д. В. Бараннік, Р. С. Онищенко // *Наукоємні технології*. – 2023. – № 3. – С. 280–288. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17949> .

3. Бараннік В. В. Метод формування інформативно-позиційної ваги для усічено-позиційної кодової системи представлення трансформованих відеосегментів / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Р. С. Онищенко, О. О. Ігнат'єв // *Наукоємні технології*. – 2023. – № 2. – С. 156–163. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.58.17652> .

4. Ревва К.В. Метод відновлення в системах стиснення для забезпечення цілісності відеоданих / К. В. Ревва, В. В. Бараннік // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Т. 36 (75), № 6, ч. 1. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/07>.

5. Ревва К.В. Метод декодування компонент трансформант за діагонально-локаційним форматом / К. В. Ревва, В. В. Бараннік // *Наукоємні технології*. – 2025. – Вип. 68, № 4. – С. 479. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.19047>.

6. Ревва К.В. Метод оцінювання ефективності усічено-позиційного кодування для інфокомунікаційних систем / К. В. Ревва, В. В. Бараннік, Д. В. Бараннік, Р. С. Онищенко, М. В. Бабенко // *Наукоємні технології*. – 2024. – № 2. – С. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18711>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. K. Revva, Yudin O. Platform Adaptive Integer AC Technology Combination / O. Yudin, H. Dmytro, R. Onyshchenko, I. Pantas, O. Mukoviz // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT): proceedings (Kyiv, Ukraine, 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 43–46. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024192. **Scopus**

8. Revva K. Integration of Video Image Decryption Coding into a Remote Video Information Service / K. Revva, V. Barannik, A. Krasnorutsky, S. Shulgin, V. Kolesnyk, N. Kharchenko // 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2023). – Lviv: IEEE, 2023. – P. 1–6. DOI: 10.1109/AICT61584.2023.10452679. **Scopus**

9. Barannik V. Method of Integrating Infocommunication Technology for Encoding Video Segments into Standardized Platforms / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, M. Babenko, O. Shaigas, G. Pris // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv: IEEE, 2024. – P. 42–47. DOI: 10.1109/TCSET64720.2024.10755845. **Scopus**

10. Revva K. Method of Coding Video Flow Segments Containing Motion Objects / K. Revva, R. Onyshchenko, V. Barannik, O. Kulitsa, P. Pertsev, M. Bielous // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv: IEEE, 2024. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TCSET64720.2024.10755532. **Scopus**

11. Barannik V. Model Functional Transformations for Formation Syntactic Description Diagonals Transformer / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, Y. Babenko, M. Komarov, O. Matviichuk-Yudina // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT): proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv: IEEE, 2024. – P. 65–71. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222435. **Scopus**

12. Revva K. Method for Encoding Transformed Video Segments in Truncated-Positional Space / K. Revva, R. Onyshchenko, V. Barannik, M. Babenko, D. Barannik, L. Chernysh // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT): proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv: IEEE, 2024. – P. 72–77. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222446.

Scopus

13. Barannik V. Technique for encoding clustered transformants in differentially-normalized space / V. Barannik, K. Revva, E. Eliseev, M. Babenko, O. Yudin, O. Yudin, Y. Tsimura // CH&CMiGIN'25: Fourth International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Kyiv, Ukraine, 20–22 June 2025). – URL: <https://eur-ws.org/Vol-4024/short08.pdf>. **Scopus**

14. Barannik V. Method for Creating the Concept of Compression Encoding Transformed Segments / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, M. Babenko, P. Pertsev, S. Fediuk // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT): proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv: IEEE, 2024. – P. 112–118. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222418. **Scopus**

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів.....	17
Вступ.....	18
1. Обґрунтування напрямку підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж з використанням систем стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів.....	29
1.1. Обґрунтування необхідності підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж	30
1.2. Обґрунтування наявності дисбалансу в процесі передачі відеопотоку з використанням бездротових інфокомунікаційних мереж.....	36
1.3. Аналіз систем стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів	45
1.4. Постановка завдань на дослідження	49
Висновки за першим розділом дисертації.....	52
2. Метод кодування прогнозно-залишкових блоків в системах стиснення з компенсацією руху для інфокомунікаційних мереж.....	53
2.1. Формування технологічного підходу до кодування прогнозно-залишкових блоків в системах стиснення з компенсацією руху	54
2.2. Розробка методу квантування з формуванням стійких структурних патернів за неоднорідністю першого порядку	65
2.3. Створення математичної моделі щодо визначення рівня інформативності прогнозно-залишкових блоків на основі структурування їх спектрального простору.....	73
2.4. Побудова методу кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі для платформ стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів	83
Висновки за другим розділом.....	94
3. Метод реконструкції послідовностей в нерівномірно діагональному-структурованому спектральному просторі залишкових блоків.....	97
3.1. Побудова підходу для процесу відновлення структурованих	98

трансформант прогнозно-залишкових блоків.....	
3.2. Розробка теоретичних засад для декодування структурованих транс-діагоналей на основі структурно зумовленого позиційного базису.....	102
3.3. Створення методу структурно-зумовленого позиційного декодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків.....	110
3.4. Побудова способу відновлення прогнозно-залишкових блоків в часовому просторі на основі де-квантування та реструктуризації спектрального простору.....	118
Висновки за третім розділом.....	121
4. Порівняльне оцінювання ефективності систем стиснення для передачі відеоданих в інфокомунікаційних мережах	124
4.1. Обґрунтування методології оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів ...	125
4.2. Порівняльне оцінювання ефективності стиснення типових кадрів відео-групи з використанням методології модульно-кодового опису відео блоку.....	136
4.3. Оцінювання впливу методів кодування прогнозно-залишкових блоків систем стиснення з компенсацією руху на ефективність функціонування інфокомунікаційних мереж	141
Висновки за четвертим розділом.....	151
Висновки.....	154
Перелік джерел посилання.....	162
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	185
Додаток Б. Приклади відновлених відеокадрів у складі групи з використанням методів кодування прогнозно-залишкових блоків.....	188
Додаток В. Акт реалізації результатів науково-прикладних досліджень.....	196

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АСУ	– автоматизована система управління
БПЛА	– безпілотні літальні апарати
ДКП	– дискретне косинусне перетворення
ІКМ	– інфокомунікаційна мережа
КЗ	– контекстна залежність
ПЗ	– прогнозно-залишковий блок
ПЗСП	– прогнозно-залишкового блоку в спектральному просторі
РДС	– рівномірно-двовимірної системи
ANS	– асиметрична система числення
CABAC	– двійкове цілочисельне арифметичне кодування
CAVLC	– контекстно-адаптивне кодування змінної довжини
CTU	– Coding Tree Unit – одиниця дерева кодування
CU	– Coding Unit – одиниця кодування
GOP	– група з 8 або 16 відеокадрів
PSNR	– пікове відношення сигнал/шум
PU	– Prediction Unit – одиниця передбачення
RDO	– Rate-Distortion Optimization – оптимізація за критерієм

швидкість-спотворення

RQT	– Residual Quadtree – квадродерево залишків
SPB	– структурно-зумовлене позиційне число
SBPC	– структурно-зумовлене позиційне кодування
SPBN	– структурно-зумовлені позиційні числа
SSIM	– індекс структурної подібності відеозображень
TU	– Transform Unit – одиниця трансформування

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток інфокомунікаційних систем та мереж (ІКМ) має одне з ключових значень для зміцнення обороноздатності та науково-технічного потенціалу, сталого розвитку економіки, промисловості та суспільства [21; 121]. Однак в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій (антропогенного, техногенного або природного походження) виникають значні ризики втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж (ІКМ). Основними чинниками тут можуть бути:

руйнування сегментів інфокомунікаційних систем та мереж, пошкодження телекомунікаційної інфраструктури (наприклад, внаслідок вогневого ураження засобів телекомунікації);

вивід із ладу джерел енергопостачання для телекомунікаційного обладнання (наприклад, виникнення критичності енерго-запасу антен мобільного зв'язку або Wi-Fi-роутерів);

використання засобів РЕБ для здійснення перешкод в процесі передачі інформації з використанням бездротових каналів зв'язку[143];

перехват управління БПЛА, як платформи для реєстрації та передачі інформації;

виконання оперативних завдань в складних умовах місцевості, що обмежує можливість використання більш потужних засобів ІКМ;

унеможливлення використання дротових ІКМ. Це спричиняє потребу застосовувати бездротові канали, які характеризуються відносно меншою швидкістю передачі даних.

Водночас збільшується потреба у підвищенні якості надання відеоінформаційних послуг [68; 74]. Це зумовлено:

збільшенням швидкості передачі інфокомунікаційних мереж, що збільшує попит до більш високої якості відеопотоку;

використанням штучного інтелекту в системах аналізу та прийняття рішень. Це зумовлює використання для аналізу відеозображень

інтелектуальних технологій ідентифікації, класифікації та визначення стану об'єктів інтересу. Відповідно висовують вимоги до збільшення розподільної здатності відеокадрів, що напряду впливає на підвищення точності вирішення завдань з аналізу об'єктів в автоматичному режимі;

підвищенням продуктивності обчислювальних систем, що сприяє розвитку робототехніки та технологій комп'ютерного зору.

Це призводить до значного зростання інтенсивності відеопотоку та критичного рівня дисбалансу у разі потреби його доставки в реальному часу з використанням бездротових інфокомунікаційних мереж. Значимість рівня дисбалансу проявляється вже починаючи з формату кадру 4K.

Використання сучасних систем стиснення не забезпечує усунення такого дисбалансу за умов дотримання вимог щодо потрібного рівня цілісності та розподільної здатності [15; 24; 132; 149].

Звідси виникає протиріч між:

- 1) з одного боку інтенсивністю кодованого відеопотоку з потрібним рівнем розподільної здатності та цілісності;
- 2) з іншого боку рівнем швидкості передачі даних для найбільш розповсюджених на практиці бездротових ІКМ.

Це призводить до втрат оперативності доставки відеопотоку.

Звідси актуальною є **науково-прикладна задача**, яка стосується зниження інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Одним з ефективних напрямків вирішення сформульованої задачі є подальший розвиток систем стиснення, в тому числі з використання технологій компенсації руху динамічних об'єктів.

Розвитком теоретичних засад та практичних реалізацій систем стиснення займалось багато вчених. Серед них вітчизняними є : Бараннік В.В., Жураківській Б.Ю., Климаш М.М., Корольов А.В., Лукін В.В., Рубан І.В., Толюпа С.В., Юдін О.К. До іноземних вчених слід віднести таких : Вудс Р., Гонсалес Р., Претт У.К., Шеннон К. та інші.

Прикладами сучасних систем стиснення з компенсацією руху є стандартизовані платформи HEVC/H265 та VVC/H266 [20; 63; 88; 135]. Тому подальший розвиток таких систем необхідно здійснювати з врахуванням того, що одним з ключових технологічних етапів є процес ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі. В цьому разі в якості ентропійного кодування використовується метод двійкового цілочисельного арифметичного кодування CABAC [138; 139].

В загалі можна виділити два напрямки подальшого вдосконалення таких систем кодування:

- 1) вдосконалення методів ентропійного стиснення, в тому числі двійкового цілочисельного арифметичного кодування;
- 2) розробка та верифікація нових альтернативних методів кодування прогнозно-залишкових блоків в спектральному просторі без внесення втрат цілісності.

Перший варіант оснований на вдосконаленні цілочисельного арифметичного кодування двійкового опису трансформанти з побудовою контекстних моделей [6-8; 11; 52]. Подальший розвиток такого напрямку безумовно має перспективу. Водночас для нього притаманним є виникнення складнощів щодо виявлення статистичних залежностей в спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків, які мають підвищений інформативний рівень.

Випадки появи таких блоків зумовлено, наприклад, наступним:

- змістом інформації, про об'єкти інтересу;
- неточністю формування прогнозних оцінок для утворення прогнозно-залишкових блоків;
- неточністю компенсації руху об'єктів між кадрами;
- наявністю динаміки не тільки руху об'єктів, а також й зміни масштабу;

- обмеженістю щодо можливості використовувати технології компенсації руху. Наприклад, у разі обмеженості продуктивності бортових обчислювальних комплексів.

Наявність таких факторів призводить до підвищення рівня інформативності прогнозно-залишкових (ПЗ) блоків. Це відображається в зменшенні характерних статистичних ознак, які враховуються в процесі ентропійного кодування. З іншого боку використання над-високих спотворень в процесі квантування буде наслідком непомірної втрати цілісності відеоданих.

Звідси необхідно в комплексі з методами ентропійного кодування використовувати інші підходи до обробки прогнозно-залишкових блоків. Пропонується напрямок врахування наявних структурних патернів в спектральному просторі ПЗ-блоків [34; 51; 52]. Такий напрямок зумовлено можливістю виявлення структурних патернів для блоків даних з обмеженим статистичним характером.

Таким чином *тематика дисертаційних досліджень*, яка стосується розробки методу кодування відеопотоку з компенсацію руху динамічних об'єктів для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж, є *актуальною*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у рамках: Закону України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 01.01.2022 № 75/98-ВР; Закону України «Про електронні комунікації» від 29.07.2023 № 1089-ІХ; положення «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» (затверджено Кабінетом Міністрів України від 15 травня 2013 р.). Дисертаційні дослідження проводились у відповідності із планами науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки у рамках яких була виконана НДР “Розроблення методів і засобів обробки ансамблю сигналів і розпізнавання радіовипромінюючих джерел та об'єктів в умовах апіорної

невизначеності ” ДРН №0119U001406, в якій автор дисертації був виконавцем.

Мета і задача досліджень. Мета дисертаційної роботи стосується розробки методу кодуванням 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.

Для досягнення мети дисертаційних досліджень потрібно вирішити наступні завдання:

1. Обґрунтувати та розробити метод встановлення стійких структурних патернів в спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків систем стиснення.

2. Створити математичну модель щодо визначення рівня інформативності прогнозно-залишкових блоків на основі структурування їх спектрального простору.

3. Розробити метод кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі для платформ стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів.

4. Розробити метод відновлення структурованих трансформант прогнозно-залишкових блоків на структурно-зумовленого позиційного декодування.

5. Провести порівняльне оцінювання ефективності та впливу методів кодування прогнозно-залишкових блоків систем стиснення з компенсацією руху на ефективність функціонування інфокомунікаційних мереж.

Об'єкт дослідження. Процеси зниження бітової інтенсивності відеопотоку для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Предмет дослідження. Методи кодування в системах стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів для зниження інтенсивності відеопотоку в інфокомунікаційних мережах.

Методи дослідження. Оцінювання характеристик з продуктивності інфокомунікаційних мереж здійснювалось на основі теоретичних засад та методів моделювання та проектування телекомунікаційних систем. Оцінювання залежностей між рівнем складності відео блоку та його статистичним характером (портретом) проводилось з використанням методів статистичної обробки та інтелектуального аналізу. Обґрунтування особливостей спектрального простору прогнозно-залишкових блоків організовувалось на основі застосування методів цифрової обробки сигналів та спектрального аналізу. Дослідження характеристик методів ентропійного кодування здійснювалось з використанням методів теорії інформації та кодування. Обґрунтування та побудова методу структурно-зумовленого кодування та декодування прогнозно-залишкових блоків організовувалось у відповідності з теоретичною базою усіченого позиційного кодування. Оцінювання ефективності та впливу методів кодування відео блоків на зменшення рівня інтенсивності відеопотоку проводилось на основі експериментальних досліджень з використанням програмної моделі створених методів кодування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше* 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. *Вперше* 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. *Вперше* 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. *Вперше* 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. *Вперше* 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 ПЗ-блоків в умовах збереження потрібного рівня цілісності інформації.

Новизна розроблених науково-прикладних результатів підтверджується відсутністю в положеннях теорії і практики цифрової обробки, методів кодування в системах стиснення розроблених методів структурно-зумовленого позиційного кодування та декодування.

Практичне значення отриманих результатів досліджень. Інтеграція розроблених методів кодування та декодування прогнозно-залишкових блоків в системи стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів забезпечує перевагу у підвищенні ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. Це стосується наступного:

1. Досягається перевага за рівнем стиснення відео-блоків для розробленого методу відносно стандартизованого методу CABAC, а саме: від 20 до 27 % в залежності від складності контенту відео блоку для рівня цілісності відеоінформації з PSNR: 42 – 45 дБ; SSIM: 0,98 – 0,99; від 25 до 30 % для інформативних відео блоків в режимі забезпечення цілісності на рівні PSNR: 32 – 37 дБ; SSIM: 0,91 – 0,95.

2. Досягається перевага для розробленого методу відносно існуючих у разі їх інтегрування до технологій кодування базового та передбаченого відеокадрів. Тобто: у разі кодування базових кадрів перевага становить від 20 до 25 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків; у разі кодування передбачених кадрів перевага становить від 15 до 20 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків.

3. У разі використання в системах стиснення з компенсацією руху об'єктів для кодування прогнозно-залишкових блоків розробленого методу відносно стандартизованого CABAC методу забезпечується:

1) зменшення інтенсивності відеопотоку в середньому на: 10 % у разі збереження рівня цілісності з показниками в межах PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 17 % та 9 %, якщо значення показників визначення рівня цілісності становлять відповідно: PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

2) потенціал для передачі в реальному часі відео потоків з частотою 30 кадрів/с в залежності від розподільної здатності відеокадрів за умов використання ІКМ з швидкістю передачі: 30 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77; 50 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; 100 Мбіт/с - Full HD з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

3) можливість щодо збільшення частоти кадрів в умовах передачі реального часу, а саме: на 10 кадрів у разі забезпечення рівня цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

4) можливість щодо використання більш енерго-ефективних каналів передачі даних. Це наприклад, є важливою вимогою для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних платформ та роботизованих комплексів;

5) умови для зменшення витрат на формування інфокомунікаційних мереж щодо організацію відео-обміну.

Результати досліджень реалізовані при виконанні дослідно-конструкторських робіт в: ТОВ «ЮНЕЙ ДЕФЕНС» (акт реалізації від 19.11.2025р.); ТОВ «Одеський авіаційний завод» (акт реалізації від 04.10.2025 р.).

Особистий внесок автора. Всі положення, які виносяться на захист, отримано автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить наступне: в працях [1; 12] –

розробляється метод кодування нерівномірних послідовностей в спектральному просторі в усічено-позиційних системах за умов наявності неоднорідності першого порядку. Обґрунтовується можливість застосування методу для кодування структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків; в працях [2; 14] – створюється вирішальне правило для вилучення поточного старшого елементу структурно-зумовленого позиційного числа в класі усічено-позиційного базису. Розробляється метод структурно-зумовленого позиційного декодування для відновлення транс-діагоналей спектрального простору; в праці [3] – розробляється підхід для визначення інформативно-позиційної ваги (нерівномірно-вагової складової кодового значення) усічено-позиційного числа. Це використовується в процесі створення методів структурно-зумовленого кодування та декодування; в праці [4] – розробляється метод відновлення відеоданих на основі декодування транс-діагоналей в структурно-залежному позиційному просторі трансформованих прогнозно-залишкових блоків; в праці [5] – розроблено функціональні перетворення для зворотного процесу побудови залежності між значенням структурно-зумовленого коду та перехідним форматом транс-діагональних послідовностей; в праці [6] – побудована математична модель для оцінювання інформативності відеопотоку за умов інтеграції структурно-зумовленого позиційного кодування трансформант прогнозно-залишкових блоків до систем стиснення з компенсацією руху; в праці [7] – обґрунтовуються недоліки ентропійного кодування в класі цілочисельного двійкового арифметичного базису у разі стиснення відео блоків з обмеженим статистичним характером; в праці [8] – проводиться оцінка впливу систем стиснення на якість надання відеоінформаційних сервісів; в праці [9] – розробляється підхід для забезпечення сумісності верифікації методів кодування відео блоків в системах стиснення з компенсацією руху динамічних об’єктів; в працях [10] – створюється підхід для побудови вектору руху в системах стиснення з виявленням динамічних об’єктів; в праці [11] – будується підхід для форматування спектрального

простору в нерівномірно-діагональній системі координат; в праці [13] – обґрунтовується потенціал, щодо виявлення та врахування в процесі скорочення надмірності, патернів структурного походження в трансформантах прогнозно-залишкових блоків.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися і були схвалені на наступних науково-технічних конференціях і семінарах: CH&CMiGIN'25: Fourth International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks, June 20–22, 2025, Kyiv, Ukraine; 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Lviv, Ukraine; 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine; 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine; 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 14 наукових праць, серед яких: 6 статей, включно: 1 стаття, що індексуються в міжнародній базі Web of Science; 5 статей опубліковано в фахових журналах категорії Б. Апробація результатів дисертації відображена у 8 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, які входять до складу міжнародної організації IEEE та індексуються в міжнародній базі Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатки (14 сторінок). Загальний обсяг дисертації становить 198 сторінок: у тому числі анотації на 11 сторінках, зміст на 2 сторінках, основний текст на 131 сторінках, список використаних джерел із 161 найменування на 23 сторінках. Робота містить 6 таблиць, з яких 3 на окремих 3 сторінках та 21 рисунки, з яких 10 на окремих 10 сторінках.

1. ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМ СТИСНЕННЯ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РУХУ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Обґрунтовуються основні чинники, які в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій (антропогенного, техногенного або природного походження) призводять до ризиків значної втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. Показується наявність протиріччя між з одного боку потребою у збільшенні інформаційної інтенсивності відеопотоку, та з іншого боку обмеженістю швидкості передачі та можливостей систем стиснення. Це призводить до втрат ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. Доводиться те, що найбільш сумісним з обмеженими можливостями бортових обчислювальних засобів за продуктивністю обробки є стандартизована система стиснення HEVC. Стверджується, що одним з ключових етапів системи стиснення HEVC є етап ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі. Обґрунтовується необхідність в комплексі з методами ентропійного кодування використовувати інші підходи до обробки прогнозно-залишкових блоків. Пропонується напрямок врахування наявних структурних патернів в спектральному просторі ПЗ-блоків. Такий напрямок зумовлено можливістю виявлення структурних патернів для блоків даних з обмеженим статистичним характером. Формулюється науково-прикладна задача та мета дисертаційних досліджень.

1.1. Обґрунтування необхідності підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж

Розвиток інфокомунікаційних систем та мереж (ІКМ) має одне з ключових значень для зміцнення обороноздатності та науково-технічного потенціалу, сталого розвитку економіки, промисловості та суспільства.

З використанням ІКМ вирішується комплекс завдань. До основних з них можна віднести такі:

- забезпечення обробки та обміну інформацією для функціонування АСУ [4; 21;70];
- системи надання інформаційних сервісів, в тому числі відеоінформаційних [99];
- доставка інформації для систем аналізу та прийняття рішень, в тому числі в критичній інфраструктурі [5; 19;23; 26; 48; 55; 109; 120];
- передача інформації з безпілотних платформ, в тому числі в інтересах підрозділів та структур Сил Оборони України [1; 22; 25; 31; 38-40; 47; 54; 93];
- забезпечення надання конструктивної інформації для населення, в тому числі для прифронтових та тимчасово окупованих регіонів [79;145];
- системи організації інформаційного забезпечення концепції «Безпечне місто» [97; 131; 133; 141].

Сучасні інфокомунікаційні технології останнім часом отримали потужний розвиток. Це стосується підвищення швидкості та передачі інформації для стаціонарних та мобільних користувачів (процесів). Варіант побудови комплексних гетерогенних ІКМ представлено на рис. 1.1 [21;121].

Узагальнено архітектуру таких мереж можна поділити на три основні рівні: рівень доступу (access network), агрегаційний рівень (aggregation network) та ядро мережі (core network). Функціонування інфокомунікаційної мережі базується на послідовній взаємодії цих рівнів.

Рівень доступу формує первинний трафік, що надходить до мережі від користувацьких пристроїв. Параметри цього трафіку суттєво відрізняються в

залежності від: застосованої технології доступу, умов середовища та кількості активних абонентів. У результаті на вході до мережі виникають потоки даних з неоднорідними характеристиками пропускної здатності, затримок і втрат пакетів [108; 111].

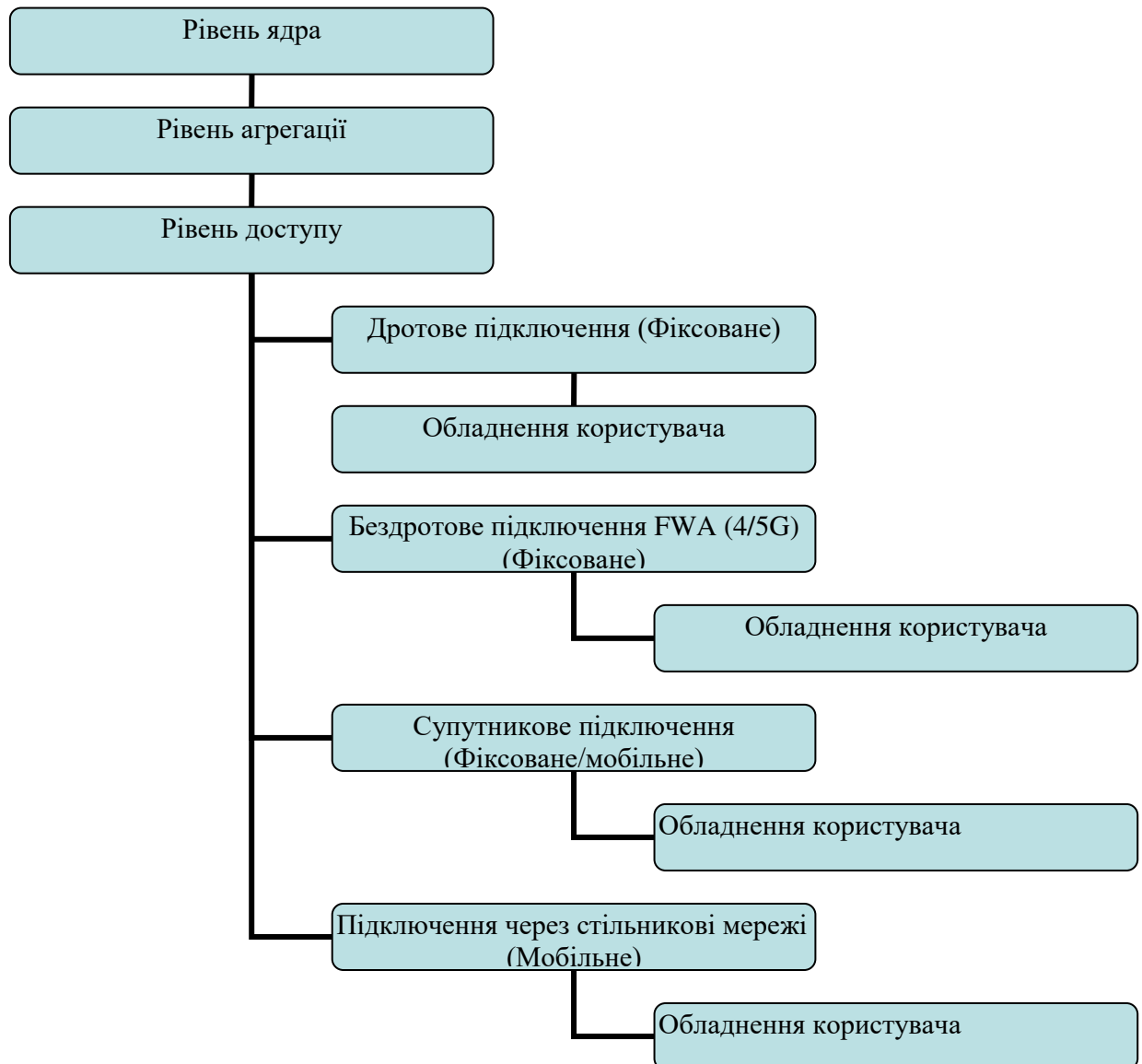


Рисунок. 1.1. – Варіант структури комплексної інфокомунікаційної мережі

Підключення споживачів відбувається двома методами: дротовим та бездротовим. При дротових підключеннях використовуються технології - FTTH / FTTP, FTTB + Ethernet, Ethernet (LAN), HFC / DOCSIS, xDSL (ADSL, VDSL2). Основні технічні характеристики дротових ІКМ наведено в табл. 1.1 [21].

Таблиця 1.1 - Характеристики дротових ІКМ

Технологія доступу	Фізичне середовище	Мін. швидкість	Макс. швидкість	Типова затримка	Втрати пакетів
FTTH / FTTP (PON)	Одномодове оптичне волокно	100 Мбіт/с	1–10 Гбіт/с	1–5 мс	< 0.01 %
FTTB + Ethernet	Оптика + кручена пара (Cat.5e/6)	100 Мбіт/с	1 Гбіт/с	1–5 мс	< 0.05 %
Ethernet (LAN-доступ)	Кручена пара (Cat.5e/6)	100 Мбіт/с	1–10 Гбіт/с	< 1–3 мс	< 0.01 %
HFC / DOCSIS	Оптика + коаксіальний кабель	50 Мбіт/с	1–10 Гбіт/с	5–20 мс	0.1–0.5 %
xDSL (ADSL/VDSL2)	Мідна кручена пара	5 Мбіт/с	100 Мбіт/с	20–50 мс	0.5–2 %
Гібридні мережі (FTTC + VDSL)	Оптика + мідь	20 Мбіт/с	200 Мбіт/с	10–30 мс	0.2–1 %

Для організації бездротового обміну інформацією використовуються такі технології ІКМ: 3G, 4G, 5G, FWA, LEO, GEO, Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ax), Направлений радіозв'язок (P2P mmWave / E-band), радіопередача з використанням каналів Ku-діапазону / Ka-діапазону, FSO / Laser (направлений оптичний зв'язок) (табл. 1.2) [69; 72; 122; 127; 151].

Комплектація ІКМ залежить від конкретних завдань та особливостей їх реалізацій. До основних таких особливостей відноситься:

- 1) тип платформи базування кінцевого обладнання ІКМ. Це можуть бути стаціонарні або мобільні платформи (наприклад, БПЛА);
- 2) відстань між користувачем інформаційного обміну. Обмін може бути між дистанційним джерелом-сенсором (стаціонарним або мобільним) інформації та пунктом прийому інформації (стаціонарним або мобільним). Наприклад між двома БПЛА або передача інформації з БПЛА до наземного пункту прийому;
- 3) сегмент ІКМ, наприклад наземний, підводний, аерокосмічний;
- 4) наявність складних умов передачі інформації. Сюди відносяться передача інформації в:
 - складних метео-умовах; передача поза прямою видимістю;
 - в умовах міської забудови; в умовах гірської місцевості;
 - в умовах наявності перешкод;
 - в умовах: наявності дії засобів РЕБ та ризиків щодо знищення засобів передачі інформації;
- 5) цільове призначення інформації:
 - в інтересах управління військовими підрозділами під час бойових дій;
 - в інтересах підрозділів попередження та ліквідації кризових ситуацій;
 - в інтересах суспільства, наприклад інформування населення;
 - в персональних інтересах особистості, в тому числі передача персональних даних, медичних даних

Таблиця 1.2 - Характеристики бездротових підключень

Технологія	Частотний діапазон	Дальність дії	Мінімальна швидкість S_{tr}	Максимальна швидкість S_{tr}	Типова затримка	Втрати пакетів
3G (UMTS / HSPA)	900–2100 МГц	0.5 – 15 км	1–5 Мбіт/с	14–42 Мбіт/с	80–150 мс	1–3 %
4G (LTE / LTE-A)	700–2600 МГц	0.2 – 20 км	10–50 Мбіт/с	100–1000 Мбіт/с	20–60 мс	0.3–2 %
5G NR (Sub-6 GHz)	600–3800 МГц	0.2 – 15 км	50–300 Мбіт/с	10 Гбіт/с	10–30 мс	< 1 %
FWA (4G / 5G)	700–3800 МГц	1 – 15 км	20–200 Мбіт/с	10 Гбіт /с	20–50 мс	0.5–2 %
Satellite (LEO)	Ku / Ka	500 – 2000 км	50–150 Мбіт/с	200 Мбіт/с	30–60 мс	0.5–2 %
Satellite (GEO)	Ku / Ka	$\approx 35\,786$ км	10–30 Мбіт/с	50 Мбіт/с	500–700 мс	1–3 %
Wi-Fi 802.11n/ac/ax	2.4 / 5 / 6 ГГц	Від 50 до 150 м	54 Мбіт/с	9.6 Гбіт/с	1–10 мс	< 1%
Радіозв'язок P2P mmWave	60–90 ГГц (mmWave); 71–86 ГГц (E-band)	0.1–3 км	1 Гбіт/с	10 Гбіт/с	< 1 мс	< 0.01%
Радіозв'язок FSO / Laser	Інфрачервоний діапазон (~1550 нм)	0.1–10 км	100 Мбіт/с	10 Гбіт/с	< 1 мс	< 0.01%

Водночас в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій (антропогенного, техногенного або природного походження) виникають значні ризики втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж (ІКМ). Основними чинниками тут можуть бути:

- руйнування сегментів інфокомунікаційних систем та мереж, пошкодження телекомунікаційної інфраструктури (наприклад, внаслідок вогневого ураження засобів телекомунікації);
- вивід із ладу джерел енергопостачання для телекомунікаційного обладнання (наприклад, виникнення критичності енерго-запасу антен мобільного зв'язку або Wi-Fi-роутерів);
- використання засобів РЕБ для здійснення перешкод в процесі передачі інформації з використанням бездротових каналів зв'язку;
- перехват управління БПЛА, як платформи для реєстрації та передачі інформації;
- виконання оперативних завдань в складних умовах місцевості, що обмежує можливість використання більш потужних засобів ІКМ;
- унеможливлення використання дротових ІКМ. Це спричиняє потребу застосовувати бездротові канали, які характеризуються відносно меншою швидкістю передачі даних;
- наявності обмеженої економічної обґрунтованості впровадження сучасних ІКМ для невеликих місць та сільської місцевості з низькою концентрацією населення. Крім того, для місць з малою щільністю абонентів використовуються підключення до стільникових мереж та підключення до супутників. Однак підключення до стільникових мереж будуть мати набагато меншу швидкість у порівнянні з швидкістю у великому місті, це пов'язано з тим що базові станції у місцях малої щільності абонентів працюють на низьких частотах для того щоб мати максимальний радіус покриття, а тому надають набагато меншу швидкість. Таким чином навіть при FWA підключенні 4G зможе дати швидкість не більшу за 50 Мбіт\с, а 5G та LEO до 150 Мбіт\с. [69; 127; 145].

Наслідками чого, є:

- 1) зменшення потенціалу засобів ІКМ щодо швидкості передачі інформації;
- 2) обмеженості можливості щодо дальності передачі інформації з потрібним рівнем швидкості та стійкістю до каналних завад;
- 3) обмеженістю сеансу зв'язку з дистанційними платформами.

Звідси слідує наявність ризиків щодо можливостей ІКМ для забезпечення потрібної якості надання інформаційних сервісів.

Отже за наведеним матеріалом можна заключити наступне:

1. Наведена залежність комплектації ІКМ від характеру та складності прикладних завдань та особливостей їх реалізацій.
2. Обґрунтовано основні чинники, які в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій (антропогенного, техногенного або природного походження) призводять до ризиків значної втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

1.2. Обґрунтування наявності дисбалансу в процесі передачі відеопотоку з використанням бездротових інфокомунікаційних мереж

Найбільш критичні ситуації виникають у разі необхідності надання відеоінформаційних послуг. Особливо для варіанту використання бездротових інфокомунікаційних мереж.

Таке пояснюється зростанням вимог до наступних характеристик відеопотоку:

- роздільна здатність ($K \times L$) відеокадрів;
- степеня кольорової насиченості, включно: збільшення кількості кольорових компонент, що утворюють цифрову модель відеозображення; глибини цифрування, тобто кількості i_{px} біт на один елемент кольорової компоненти;

- частоти n_{frc} кадрів для відеопотоку.

Звідси витікає збільшення бітової інтенсивності $I_b(n_{\text{frc}})$ відеоінформаційного трафіку. Це визначається виразом:

$$I_b(n_{\text{frc}}) = n_{\text{frc}} \cdot i_{\text{px}} \cdot K \cdot L \text{ (біт)}. \quad (1.1)$$

В табл. 1.3 представлені основні формати відеокадрів та розрахунки інтенсивності $I_b(n_{\text{frc}})$ відеопотоку. Звідси бачимо, що інтенсивність відеопотоку навіть з обмеженою частотою ($n_{\text{frc}}=30$ кадрів/с), значно зростає у разі покращення формату відеокадру (розподільної здатності). Отже рівень інтенсивності вже з формату 4K UHD починає перевищувати 10 Гбіт/с. [74].

Причинами цього, є:

1) збільшення швидкості передачі інфокомунікаційних мереж також, збільшує попит до більш високої якості відеопотоку та відеозображення. Дедалі більше зростає попит на відео, прямі трансляції, VR з високою роздільною здатністю [68];

2) використання штучного інтелекту в системах аналізу та прийняття рішень. Це зумовлює використання для аналізу відеозображень інтелектуальних технологій ідентифікації, класифікації та визначення стану об'єктів інтересу. Відповідно висовують вимоги до збільшення розподільної здатності відеокадрів, що напряду впливає на підвищення точності вирішення завдань з аналізу об'єктів в автоматичному режимі [32; 75; 86; 91];

3) підвищення продуктивності обчислювальних систем сприяє розвитку робототехніки та технологій комп'ютерного зору.

Означена тенденція охарактеризовано компанією Cisco, яка є провідною в галузі створення та проектування телекомунікаційного обладнання. Згідно чого перша половина 2020-х років буде відмічатися стрімким зростанням відеотрафіку в середньому за сервісами 3,25 рази [68].

Таблиця 1.3. – Значення коефіцієнту h балансу між інтенсивністю початкового відеопотоку та швидкістю передачі з використанням ІКМ

Формат цифрового відеокадру ($K \times L$)	Інтенсивність $I_b(n_{\text{fr}})$ початкового відеопотоку з частотою $n_{\text{fr}}=30$, Мбіт	Швидкість S_{tr} передачі з використанням ІКМ, Мбіт/с				
		10	30	50	100	330
CIF (352 x 288) $K \times L=0,1$ Мрх	72	7,2	2,4	1,44	0,72	0,218
HD (720p) (1280 x 720) $K \times L=0,92$ Мрх	663	66,3	22,1	13,26	6,63	2,009
Full HD (1080p) (1920 x 1080) $K \times L=2$ Мрх	1440	144	48	28,8	14,4	4,363
4K Ultra HD HV (3840 x 2160) $K \times L=8,3$ Мрх	5976	597,6	199,2	119,52	59,76	18,109
4K UHD (4128 x 3096) $K \times L=12,78$ Мрх	9201	920	306	184	92	27

Для оцінки відповідності між рівнем інтенсивності $I_b(n_{\text{frc}})$ відеопотоку та швидкістю S_{tr} передачі даних з використанням ІКМ введемо коефіцієнт h балансу:

$$h = I(n_{\text{frc}}) / S_{\text{tr}}. \quad (1.2)$$

З аналізу даного співвідношення можна стверджувати те, що баланс між інтенсивністю відеопотоку та швидкістю передачі даних досягається коли для коефіцієнта h виконується нерівність:

$$h \leq 1. \quad (1.3)$$

Саме в такому випадку створюється умова для доставки відеоданих в реальному часі.

В той же час, як бачимо з даних в табл. 1.3, величина коефіцієнта h переважно має значення більше ніж 2, тобто $h > 1$. Отже має місце дисбаланс між інтенсивністю відеопотоку та швидкістю передачі даних. Причому такий дисбаланс має значний прояв для більш затребуваних з прикладного застосування форматів відеокадрів.

Для зменшення інтенсивності відеопотоку використовуються системи стиснення [30; 58-60; 65; 90; 153]. Сучасними стандартизованими системами стиснення відеопотоку є технології HEVC/H265 та VVC/H266 [61-63; 135]. Система HEVC/H265 більш сумісна з умовами використання для мобільних платформ. Це пояснюється меншими вимогами до продуктивності бортового обчислювального комплексу [2; 18].

У разі застосування систем стиснення для кодування відеопотоку необхідно враховувати те, що коефіцієнт $\mu(n_{\text{frc}})$ стиснення залежить від рівня loss градацій цілісності відновленого відеоконтенту. Рівень loss цілісності відеоданих визначається за кількісними показниками. До основних з них відносяться наступні показники [84; 96; 140; 152]:

1. PSNR – показник пікового відношення сигнал/шум [140], який залежить від MSE, тобто:

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2^{2 \cdot i_{px}}}{\text{MSE}} \right) \text{дБ}; \quad (1.4)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{K \cdot L} \cdot \sum_{\tau=1}^{n_{frc}} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L (\tilde{x}(i, j)_{\tau} - x(i, j)_{\tau})^2.$$

Тут:

i_{px} - кількість біт на один елемент кольорової компоненти;

$2^{2 \cdot i_{px}}$ - максимальне можливе значення яскравості пікселя (для $i_{px}=8$, то $2^{2 \cdot i_{px}} = 65025$ $L=255$);

MSE – дисперсія квадрату різниці між елементами відновленого та початкового відеокадру;

$x(i, j)_{\tau}$, $\tilde{x}(i, j)_{\tau}$ - значення (i, j) -го пікселя відповідно початкового та відновленого τ -го відеокадру;

n_{frc} - кількість кадрів в послідовності;

$K \times L$ - просторове розділення зображення;

τ - індекс кадру в послідовності;

В якості рекомендованих значень показника PSNR для відеозображень з різним рівнем семантичної складності пропонуються наступні граничні межі: рівень складності високий, то PSNR: 42 – 45 дБ; рівень складності середній, то PSNR: 32 – 37 дБ; рівень складності низький, то PSNR: 23 – 28 дБ. Це дозволяє оцінити загальний рівень деградації відеозображення.

Показник PSNR є класичною енергетичною метрикою оцінювання якості відеозображень, що забезпечує просту та формалізовану оцінку рівня

піксельних спотворень. Однак його застосування доцільне переважно на етапах порівняльного аналізу та оптимізації алгоритмів стиснення, а не для комплексної оцінки якості візуальної інформації. У сучасних інфокомунікаційних системах, орієнтованих на збереження структурної та семантичної інформативності, PSNR повинен використовуватися у поєднанні з більш складними структурними та інтелектуальними показниками якості [71; 81; 87; 117; 154; 158].

2. SSIM – коефіцієнт структурної подібності між початковим та відновленим відео блоками. Показник SSIM (Structural Similarity Index) належить до класу повноопорних (full-reference) метрик якості, орієнтованих на оцінювання структурної подібності між еталонним і відновленим зображеннями. На відміну від PSNR, який базується на піксельній похибці, SSIM моделює візуальне сприйняття людини, фокусуючись на збереженні локальної структури сцени. Основна ідея SSIM полягає в припущенні, що людська зорова система найбільш чутлива не до абсолютних значень яскравості, а до відносних змін структури. Такі зміни можуть проявляються у вигляді кореляцій між сусідніми пікселями. Метрика SSIM моделює візуальне сприйняття людини, фокусуючись на збереженні локальної структури сцени. Тому оцінювання структурної подібності між еталонним і відновленим відеозображеннями відбувається на основі трьох компонентів: яскравість, контраст, структура. У математичному представленні компоненти SSIM виглядають так:

- компонент яскравості:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x \mu_y + C_1}{\mu_x + \mu_y + C_1},$$

де $\mu_x + \mu_y$ - середні значення яскравості у локальних вікнах; C_1 - стабілізуюча константа;

- компонент контрасту:

$$s(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

де σ_x, σ_y - стандартні відхилення, що характеризують локальний контраст;
- структурний компонент:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3},$$

де σ_{xy} - коваріація між відповідними вікнами зображень.

На практиці часто використовують спрощену форму:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1) \cdot (2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x + \mu_y + C_1) \cdot (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}.$$

Показник SSIM набуває значень у діапазоні: $-1 \leq SSIM \leq 1$. Тут 1 — повна структурна ідентичність; 0 — відсутність структурної подібності; від'ємні значення — сильні спотворення. При цьому рекомендована інтерпретація значень показника SSIM наведена в табл. 1.4.

Таблиця 1.4. - Практичні інтервали інтерпретації показника SSIM

Значення SSIM	Інтерпретація
0.95 – 1.00	Дуже висока структурна якість
0.90 – 0.95	Висока якість
0.80 – 0.90	Прийнятна якість
< 0.80	Значна структурна деградація

Показник SSIM є більш інформативною метрикою якості порівняно з PSNR, оскільки враховує структурні властивості відеозображення та особливості зорового сприйняття [117; 152; 154].

В якості рекомендованих значень показника PSNR для відеозображень з різним рівнем семантичної складності пропонуються наступні граничні межі: рівень складності високий, то SSIM: 0,98 – 0,99; рівень складності середній, то SSIM: 0,91 – 0,95; рівень складності низький, то SSIM: 0,62 – 0,77. Це дозволяє оцінити загальний рівень деградації відеозображення.

Розглянемо оцінювання коефіцієнту h балансу між рівнем інтенсивності $I_b(n_{\text{frc}})$ відеопотоку та швидкістю S_{tr} передачі даних з використанням систем стиснення. При цьому коефіцієнт стиснення $\mu(n_{\text{frc}})$ обирався таким, що б забезпечити умови допустимих значень рівня цілісності loss за показниками PSNR та SSIM представлено на рис. 1.2.

Аналізуючи діаграми на рис. 1.2 з врахуванням порівняння рівнів швидкості передачі можна стверджувати те, що для найбільш розповсюджених на практиці швидкостей передачі не забезпечується баланс щодо передачі в реальному часі відеопотоку з потрібним рівнем розподільної здатності. Рівень дисбалансу в залежності від швидкості передачі, рівня цілісності та типу формату відеокадру може сягати від 30 до 90 %. Водночас у разі збільшення рівня стиснення на основі використання існуючих систем будуть виникати значні втрати цілісності.

Звідси можна зробити висновок щодо наявності протиріччя між з одного боку потребою у збільшенні інформаційної інтенсивності відеопотоку, та з іншого боку обмеженістю швидкості передачі та можливостей систем стиснення.

Це призводить до втрат ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

Таким чином, необхідно вирішити актуальну **науково-прикладну задачу**, стосовно зниження інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

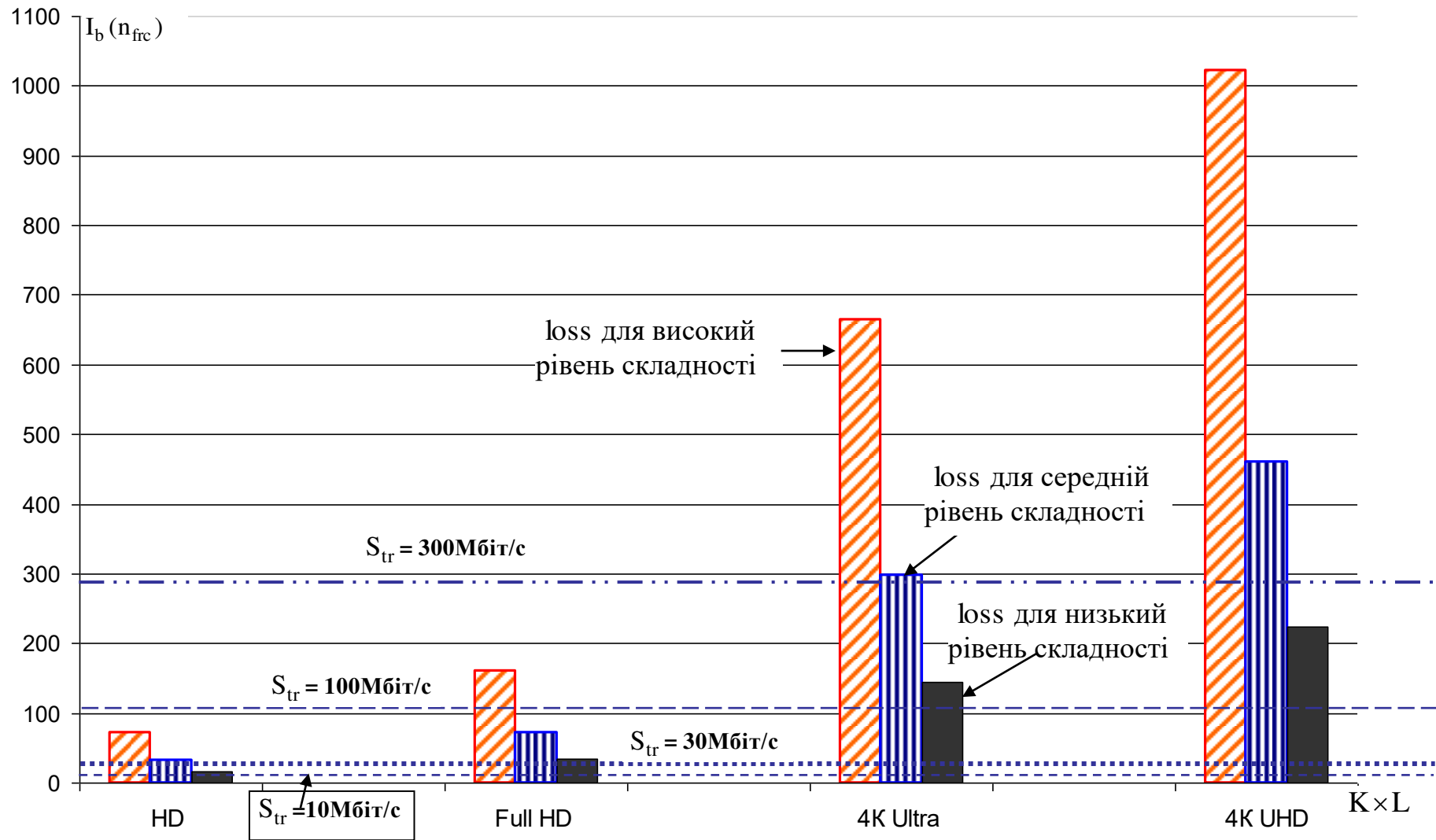


Рисунок 1.2. – Значення $I_b (n_{frc})$ та h з використанням систем стиснення в залежності від рівня допустимого цілісності loss для різної розподільної здатності відеокадрів

1.3. Аналіз систем стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів

Для стиснення відеопотоку однією з найбільш ефективних є стандартизована технологія HEVC/H265 [78; 114; 135; 136; 142]. Структурно-функціональна схема кодування за методом HEVC (H.265). Дана технологія відноситься до класу систем стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів [83]. При цьому потік кадрів розділяється на групи кадрів (по 8 кадрів в кожній групі). Кожна група містить три типи кадрів. Базовий кадр (I-клас) та два типи передбачених кадрів (P та B класи). У разі обробки базових кадрів (I-класі) використовується метод HEVC Intra (h.265h) [95; 112; 113].

Метод HEVC Intra (h.265h) реалізує багатоступеневу процедуру перетворення вхідного зображення. Схема методу HEVC Intra представлена на рис. 1.4. Як зображено на схемі алгоритм реалізується у двох паралельних ланцюгах. Основний ланцюг кодування (блоки 1–12) перетворює вхідне зображення у стиснений бітовий потік. Другий ланцюг (блоки A–E) відновлює зображення для отримання опорних пікселів. Що забезпечує ідентичність роботи кодера та декодера. Це необхідно для того щоб кодер та декодер мали однакові опорні дані для наступних блоків.

До основних етапів, які формують ланцюг стиснення відносяться такі:

1. Суб-дискретизація хроматичних компонент Cb, Cr кольорорізнисцевої моделі YCbCr (блок 3) [102]. Це дозволяє зменшувати кількість елементів в хроматичних компонентах не змінюючи компоненту Y яскравості. Даний етап створює умови для зменшення бітової інтенсивності відеоданих від 10 до 30 % в залежності від агресивності глибини суб-дискретизації.

2. Адаптивне блокове розбиття кадру: CTU / CU (блок 4) [137]. Відеокадри поділяються на одиниці дерева кодування (CTU - Coding Tree Unit), які є базовою одиницею обробки кодека. Типовий розмір: 64×64 пікселі (можливі 32×32, 16×16 залежно від профілю та конфігурації кодека).

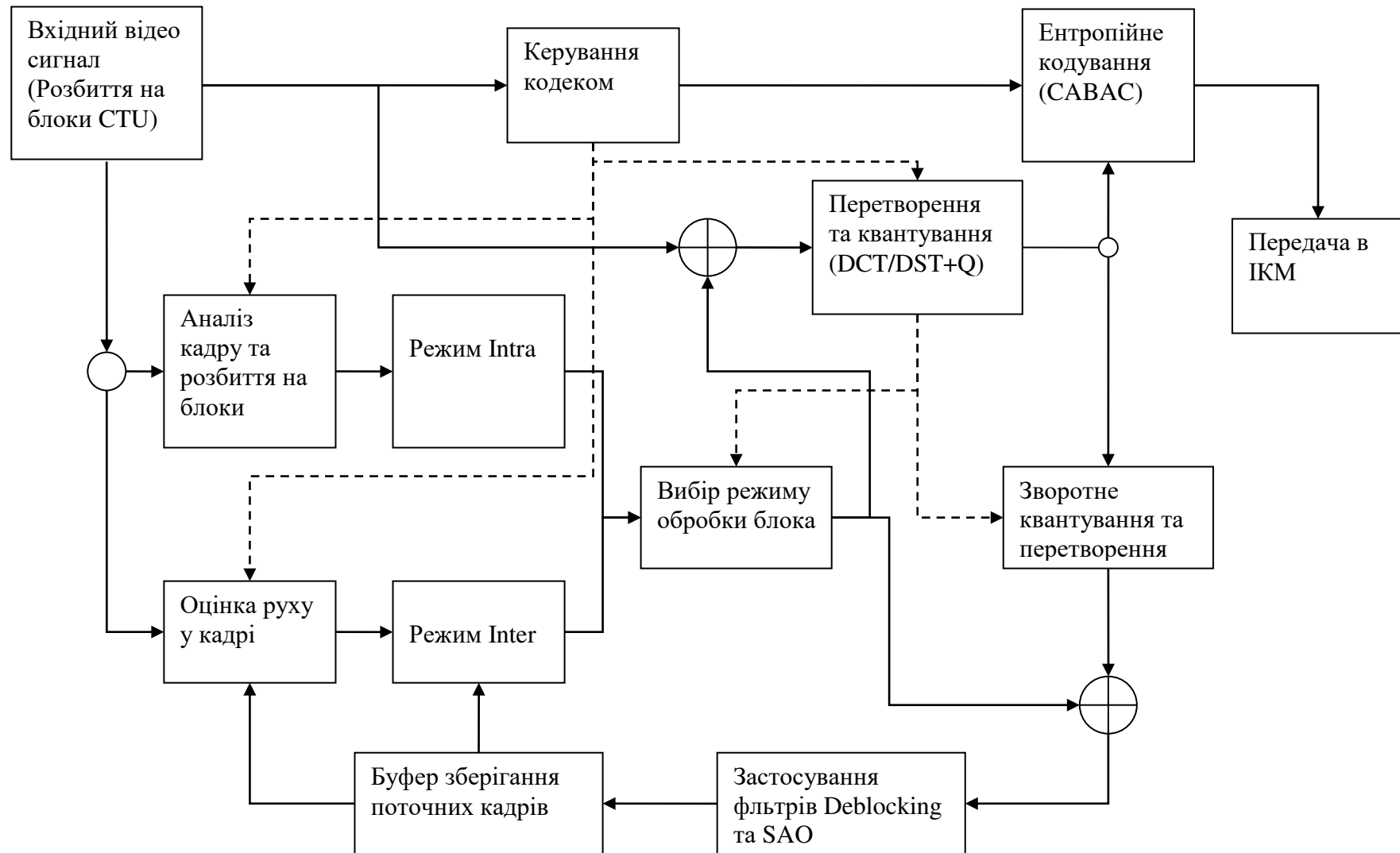


Рисунок 1.3. - Структурно-функціональна схема кодування за методом HEVC (H.265)

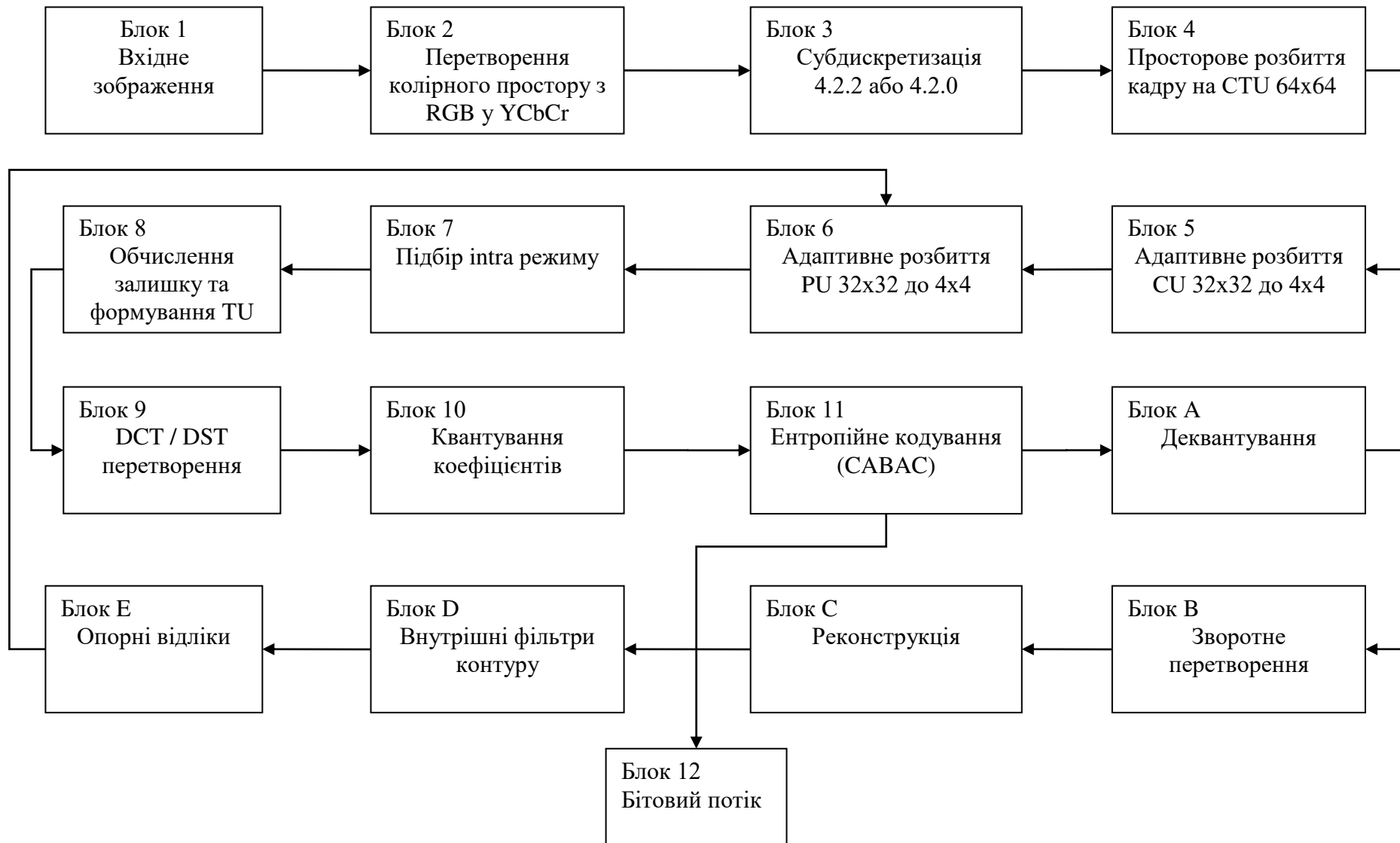


Рисунок 1.4. - Схема кодування за методом HEVC Intra (H.265)

СТУ обробляються строго послідовно — зліва направо, зверху вниз у порядку растрового сканування. Після чого рекурсивно розбиваються на одиниці кодування (CU - Coding Unit) від 32x32 до 4x4 (блок 5). Адаптивне розбиття забезпечує локальну оптимізацію просторової моделі відеозображення [61; 64; 67; 82; 85; 92; 95; 107; 126; 128; 130; 160].

3. Формування блоків PU та внутрішньо-кадрове прогнозування (блоки 6/7). Даний тип блоків (PU - Prediction Unit) є компонентою для вибору напрямку, типу та побудови прогнозової моделі.

Для кожного PU обирається оптимальний режим прогнозування з 35 доступних. Вони включають 3 типи, а саме: однорідні області (DC); плавні переходи яскравості (Planar); спрямовані (Directional). Після вибору режиму формується прогноз блоку за сусідніми пікселями. Тут формується список з найбільш підходящих режимів передбачення. Зазвичай це до 12 режимів, а саме: для більших блоків менше для малих більше. Для обраних режимів вже робиться RDO оптимізація (блок 8) [95; 118; 128; 130; 160].

Точне просторове прогнозування зменшує дисперсію залишкового сигналу. Це створює умов для зменшення інтенсивності відеопотоку в середньому від 10 до 30 % порівняно з режимом відсутністю прогнозування [50; 65; 83; 129].

4. Формування прогнозно-залишкових блоків (блок 8). Для формування таких блоків використовується інформація блоків CU. Після чого прогнозно-залишкові блоки поступають на трансформування. Такі блоки позначаються, як TU (TU - Transform Unit). При цьому розмір блоків трансформування TU визначається незалежним квадродеревом залишків (RQT - Residual Quadtree). Рішення про розбиття RQT приймається на основі RDO.

5. Трансформування блоків TU здійснюється з використанням методів дискретного косинусного/синусного перетворень (DCT/DST) (блок9). В цьому разі досягається концентрація енергії сигналу в обмеженій кількості низькочастотних компонент [73; 80; 89, 147; 161].

6. Концентрація енергії дозволяє агресивніше квантувати (блок 10) високі частоти. Це створює можливість для додаткового зменшення інтенсивності відеоданих в середньому від 15 до 25 % порівняно з кодуванням у просторовій області [66; 77; 125; 150; 159].

7. Реалізація ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків у квантованому спектральному просторі. Для цього використовується метод двійкового цілочисельного арифметичного кодування (САВАС) (блок 11). Попередньо трансформанта перетворюється в двійкову структуру (двійковий куб). Метод САВАС дозволяє зменшити інтенсивність відеоданих враховуючі переваги представлення прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі. Зменшення інтенсивності може в середньому сягати [103; 110; 123-125]:

- 30 – 70% порівняно з варіантом безпосередньої передачі ПЗ-блоків в квантовано-спектральному просторі (без кодування САВАС) [3; 13]
- 10–20 % порівняно з простішими методами ентропійного кодування (наприклад, CAVLC).

Отже на основі викладеного аналізу можна заключити те, що:

- найбільш сумісним з обмеженими можливостями бортових обчислювальних засобів за продуктивністю обробки є стандартизована система стиснення HEVC;
- одним з ключових етапів системи стиснення HEVC є етап ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі.

1.4. Постановка завдань на дослідження

Оцінювання впливу різних техно-етапів функціонування системи HEVC на загальний рівень стиснення показало [78; 114], що одним з ефективних напрямків вдосконалення ентропійного кодування. Крім того

такий напрямок відрізняється тим, що скорочення надмірності проводиться без внесення додаткових втрат цілісності. Звідси обґрунтовуються такі напрямки подальшого вдосконалення систем стиснення [139; 148; 156; 136]:

1) вдосконалення методів ентропійного стиснення, в тому числі двійкового цілочисельного арифметичного кодування [76; 98-101; 105; 146].

2) розробка та верифікація нових альтернативних методів кодування прогнозно-залишкових блоків в спектральному просторі без внесення втрат цілісності [12; 14; 16; 27-29; 35-41; 43; 46; 49; 56; 57].

Перший варіант оснований на цілочисельному арифметичному кодуванні двійкового опису трансформанти з побудовою контекстних моделей. Подальший розвиток такого напрямку безумовно має перспективу. Водночас для нього притаманним є виникнення складнощів щодо виявлення статистичних залежностей в спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків, які мають підвищений інформативний рівень [32; 86; 99; 106; 138].

Випадки появи таких блоків зумовлено, наприклад, наступним:

- змістом інформації, про об'єкти інтересу;
- неточністю формування прогнозних оцінок для утворення прогнозно-залишкових блоків;
- неточністю компенсації руху об'єктів між кадрами;
- наявність динаміки не тільки руху об'єктів, а також й зміни масштабу;
- обмеженістю щодо можливості використовувати технології компенсації руху. Наприклад, у разі обмеженості продуктивності бортових обчислювальних комплексів.

Наявність таких факторів призводить до підвищення рівня інформативності прогнозно-залишкових (ПЗ) блоків. Це відображається в зменшенні характерних статистичних ознак, які враховуються в процесі ентропійного кодування. З іншого боку використання над-високих спотворень в процесі квантування буде наслідком непомірної втрати цілісності відеоданих.

Звідси необхідно в комплексі з методами ентропійного кодування використовувати інші підходи до обробки прогнозно-залишкових блоків. Пропонується напрямок врахування наявних структурних патернів в спектральному просторі ПЗ-блоків. Такий напрямок зумовлено можливістю виявлення структурних патернів для блоків даних з обмеженим статистичним характером [6- 11; 17; 33; 40; 47; 53-55; 155].

Таким чином мета дисертаційних досліджень стосується розробки методу кодуванням 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.

Для досягнення мети дисертаційних досліджень потрібно вирішити наступні завдання:

1. Обґрунтувати та розробити метод встановлення стійких структурних патернів в спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків систем стиснення.

2. Створити математичну модель щодо визначення рівня інформативності прогнозно-залишкових блоків на основі структурування їх спектрального простору.

3. Розробити метод кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі для платформ стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів.

4. Розробити метод відновлення структурованих трансформант прогнозно-залишкових блоків на структурно-зумовленого позиційного декодування.

5. Провести порівняльне оцінювання ефективності та впливу методів кодування прогнозно-залишкових блоків систем стиснення з компенсацією руху на ефективність функціонування інфокомунікаційних мереж.

Висновки за першим розділом дисертації

1. Обґрунтовано основні чинники, які в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій (антропогенного, техногенного або природного походження) призводять до ризиків значної втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

2. Стверджено наявність протиріччя між з одного боку потребою у збільшенні інформаційної інтенсивності відеопотоку, та з іншого боку обмеженістю швидкості передачі та можливостей систем стиснення. Це призводить до втрат ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж.

3. Обґрунтовано те, що: найбільш сумісним з обмеженими можливостями бортових обчислювальних засобів за продуктивністю обробки є стандартизована система стиснення HEVC; одним з ключових етапів системи стиснення HEVC є етап ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі.

4. Доведено те, що необхідно в комплексі з методами ентропійного кодування використовувати інші підходи до обробки прогнозно-залишкових блоків. Пропонується напрямок врахування наявних структурних патернів в спектральному просторі ПЗ-блоків. Такий напрямок зумовлено можливістю виявлення структурних патернів для блоків даних з обмеженим статистичним характером.

Таким чином мета дисертаційних досліджень стосується розробки методу кодуванням 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.

Основні науково-прикладні результати досліджень, що викладено в першому розділі, опубліковано та апробовано в наукових працях: [115; 157].

2. МЕТОД КОДУВАННЯ ПРОГНОЗНО-ЗАЛИШКОВИХ БЛОКІВ В СИСТЕМАХ СТИСНЕННЯ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РУХУ ДЛЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Обґрунтовується наявність недоліків системи HEVC-стиснення, що зумовлені обмеженістю щодо: адекватності прогнозних моделей; точності моделей визначення об'єктів руху; точності визначення векторів руху динамічних об'єктів в послідовності кадрів; ефективності цілочисельного двійкового арифметичного кодування. Проводиться обґрунтування твердження відносно того, що для нерівномірно-діагонального формату трансформанти виникає потенційна спроможність відносно усунення додаткової кількості структурно-комбінаторної надмірності. Здійснюється розробка методу встановлення стійких спектрально-структурних патернів для транс-діагональних послідовностей в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Метод базується на досягненні умови неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей в процесі квантування на основі аналізу інформації за двома компонентами: квант-компоненти, що передує поточні у транс-діагоналі; перед-квантове значення поточної компоненти транс-діагоналі. Створюється математична модель для оцінювання кількості інформації в послідовностях нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Будується метод структурно-зумовленого позиційного кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкового блоку. Це створює реалізацію базового етапу загальних функціональних перетворень щодо побудови компактного опису в системі стиснення з компенсацією руху об'єктів.

2.1. Формування технологічного підходу до кодування прогнозно-залишкових блоків в системах стиснення з компенсацією руху

Характерною системою стиснення з технологією компенсації руху об'єктів є стандартизований комплекс HEVC/H265.

Особливістю HEVC-системи є використання пакету моделей для передбачення (прогнозування) блоків відеоданих. При цьому враховується режими кодування [115; 126; 135; 136]:

Intra – внутрішньо кадрова обробка. Враховуються переважно патерні, що виявляються в просторовому форматі окремих відеокадрів;

Inter обробка, навпаки, пов'язана з використанням патернів між відеокадрами в послідовності (GOP-групі).

В цьому разі одиницею кодування є блок $X(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$ відеоданих, який розглядається: з врахуванням координат (α, β) у τ -му відеокадрі GOP-групи; ℓ -го режиму прогнозування.

Використовуються два базових режими побудови прогнозованих моделей для передбачення поточного блоку $X(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$, а саме:

1. Якщо $\ell=1$, то прогнозна модель будується в режимі Intra-обробки (внутрішньокадрової). Тоді маємо прогнозований блок $X'(\alpha, \beta)_{\tau}^{(1)}$. Це прогнозований (α, β) -й блок в режимі Intra для τ -го кадру GOP-групи. Такий блок формується на основі внутрішньо кадрового передбачення з врахуванням можливих статистичних залежностей в сусідніх блоках τ -го відеокадру. Для технології HEVC передбачення в режимі Intra здійснюється з використанням інформації в $(\alpha; \beta-1)$ -му та $(\alpha-1; \beta)$ -му блоках поточного τ -го відеокадру.

2. У разі, коли $\ell=2$, то прогнозування здійснюється в режимі Inter-обробки (серед-кадрової). В цьому випадку екстраполюється блок $X'(\alpha, \beta)_{\tau}^{(2)}$. Це прогнозований (α, β) -й блок в режимі Inter. Тут прогнозований блок

формується на основі серед-кадрового передбачення. Тут враховується статистична залежність між відповідними блоками на позиціях (α, β) сусідніх відеокадрів GOP-групи. Якщо обробка проводиться для блоків τ -го відеокадру GOP, то прогнозна модель будується на основі інформації в (α, β) -му блоці $X(\alpha, \beta)_{\tau-1}^{(\ell)}$ попереднього $(\tau - 1)$ -го кадру.

Після чого утворюється прогнозно-залишковий блок $R(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$. Це (α, β) -й прогнозно-залишковий блок з ℓ -м напрямком формування моделі екстраполяції. Узагальнено для цього використовується співвідношення:

$$R(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)} = \begin{cases} X(\alpha, \beta)_{\tau}^{(1)} - X'(\alpha, \beta)_{\tau}^{(1)}, & \rightarrow \ell=1; \\ X(\alpha, \beta)_{\tau}^{(2)} - X'(\alpha, \beta)_{\tau}^{(2)}, & \rightarrow \ell=2. \end{cases} \quad (2.1)$$

Такі перетворення дозволяють використовувати статистичні залежності між сусідніми блоками для отримання такого перехідного опису, для якого досягається:

- скорочення діапазону можливих значень елементів блоків $R(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$;
- збільшення частки нульових елементів;
- наближення розподілу частот унікальних елементів блоків $R(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$ до нерівномірного.

Водночас для таких блоків залишається кількість статистичної (кореляційної) надмірності між елементами (внутрішньо-блочна статистична надмірність). Кількість такої надмірності для переважної кількості блоків зумовлено когерентністю відповідних областей відеокадру. Це обґрунтовує наступний етап процесу стиснення, який пов'язано з перетворенням прогнозно-залишкових блоків до спектрального простору.

Всю сукупність подальших технологічних перетворень HEVC-системи можна поділити на два processing-домени, які реалізуються два функціональних режими кодування:

1. Перший це основний режим. Він стосується кодування прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі. При цьому використовуються дві верифікації. Перша верифікація стосується стиснення прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі для режиму Intra-обробки. Особливо це стосується блоків базового Intra-кадру, що містять об'єкти руху. Друга верифікація здійснюється для стиснення прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі для режиму Inter-обробки.

2. Другий це додатковий режим кодування векторів руху динамічних об'єктів в послідовності групи відеокадрів.

Отже згідно з основним функціональним режимом наступним етапом HEVC-системи є представлення прогнозно-залишкових блоків в спектральному просторі. Тут матимемо прогнозно-залишковий блок $S_{Q_+}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell)}$ в спектральному просторі з використанням для опису множини Q_+ додатних раціональних чисел. Такий блок формується за результатами трансформаційних перетворень з використанням дискретного косинусного перетворення (ДК-перетворення). Для подальшого спрощення запису будемо використовувати такий запис $S(Q_+)_\tau^{(\ell)}$. Тоді:

$$S(Q_+)_\tau^{(\ell)} = \{s(i, j)_\tau^{(\ell)}\}_{i, j=1, \overline{n}}, \quad s(i, j)_\tau^{(\ell)} \in Q_+,$$

де $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$ - $(i; j)$ -а компонента прогнозно-залишкового блоку $S(Q_+)_\tau^{(\ell)}$ в спектральному просторі (ПЗСП) за умов $s(i, j)_\tau^{(\ell)} \in Q_+$;

$n \times n$ - розмір ПЗСП-блоку $S(Q_+)_\tau^{(\ell)}$;

n - розмір блоків обирається з рівною кількістю рядків та стовбців.

Відомості $z(i, j)_\tau^{(\ell)}$ про знак компоненти $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$ зберігається окремо, та входить до блоку службових даних HEVC-технології. Значення величини $z(i, j)_\tau^{(\ell)}$ утворюється за виразом:

$$z(i, j)_\tau^{(\ell)} = \text{sign}(1 - \text{sign}(s_{+,-}(i, j)_\tau^{(\ell)} + 1)) = \begin{cases} 0, & \rightarrow s_{+,-}(i, j)_\tau^{(\ell)} > -1; \\ 1, & \rightarrow s_{+,-}(i, j)_\tau^{(\ell)} \leq -1. \end{cases}$$

З врахуванням елементу $z(i, j)_\tau^{(\ell)}$ матимемо елемент $s_{+,-}(i, j)_\tau^{(\ell)}$, який представляється множиною раціональних чисел, тобто:

$$s_{+,-}(i, j)_\tau^{(\ell)} = \{ z(i, j)_\tau^{(\ell)} ; s(i, j)_\tau^{(\ell)} \} = \begin{cases} s(i, j)_\tau^{(\ell)}, & \rightarrow z(i, j)_\tau^{(\ell)} = 0; \\ -s(i, j)_\tau^{(\ell)}, & \rightarrow z(i, j)_\tau^{(\ell)} = 1. \end{cases}$$

Відповідно за всіма елементами $z(i, j)_\tau^{(\ell)}$ утворюється масив $Z_\tau^{(\ell)}$ знаків

Для зменшення складності процесу квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків пропонується використовувати елементи $s'(i, j)_\tau^{(\ell)}$. Вони представляють собою цілочисельні значення компонент $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$, тобто:

$$s'(i, j)_\tau^{(\ell)} = [s(i, j)_\tau^{(\ell)}].$$

Стандартизований процес передискретизації спектрального простору прогнозно-залишкових блоків $S'_\tau^{(\ell)}$ здається виразом:

$$q(i, j)_\tau^{(\ell)} = \left[\frac{s'(i, j)_\tau^{(\ell)}}{\varphi_{qu}(\rho, i, j)} \right], \quad (2.2)$$

де $q(i, j)_\tau^{(\ell)}$ - (i, j) -а квант-компонента прогнозно-залишкового блоку $Q_\tau^{(\ell)}$ в квантованому спектральному просторі, $q(i, j)_\tau^{(\ell)} \in \mathbb{N}$;

$\varphi_{qu}(\rho, i, j)$ - значення функції квантування для визначення (i, j) -го елементу $\lambda(i, j)$ квант-матриці Λ згідно обраної стратегії та параметру ρ візуальної якості.

Основне призначення перетворення прогнозно-залишкового блоку до спектрального опису пояснюється створенням переважних властивостей для збільшення ефективності ентропійного кодування. В системі HEVC-стиснення ентропійне кодування реалізується за допомогою двійкового цілочисельного арифметичного кодування (САВАС). В загальній ефективності методів ентропійного кодування залежить від ступеня нерівномірності розподілу частот в блоках даних. Відповідно такі властивості залежать від:

- типу інформативності та складності початкових блоків відеоданих;
- ефективності ланцюга технологічних перетворень від початкового блоку до створення перед-кодованого опису.

Звідси збільшення складності відео-блоків за семантичним складом та неадекватність моделей, які лежать в основі їх обробки, призводять до втрати ефективності САВАС-кодування [135; 139; 157]. В цьому ракурсі найбільш характерними критичними випадками є наступні:

1. Обмеженою можливістю виявлення залишкових ймовірнісно-статистичних патернів за умов виключення втрат інформації в блоках, які мають наступні особливості. Є опорними (Intra-блоками), що містять об'єкти, для яких буде визначатися вектор руху в послідовності групи кадрів. Прогнозування таких блоків тобто побудова прогнозової моделі буде мати обмежену адекватність. Це зумовлено тим, що в стандарті HEVC/H265.Intra для побудови прогнозової моделі поточного блоку використовується інформація по двом попереднім блокам (з лівого блоку (стовпця) та зверхнього рядку). Однак інформація, що використовується для побудови прогнозних значень в даному випадку матиме обмежену статистичну залежність з блоком, який містить компоненти об'єктів руху. Особливо це має прояв у разі:

- якщо невірно було визначено вектор руху динамічного об'єкту між сусідніми кадрами (в процесі формування прогнозних кадрів (кадри Р та В типів);

- якщо динамічний об'єкт масштабується. Це дозволяє точно визначити вектор руху об'єкту за сегментами між сусідніми кадрами;
- коли, прогнозна модель не адекватно екстраполуює поточний блок або різницю між блоками.

2. Існує залежність рівня стиснення від наявності можливості щодо збільшення кількості скорочуємої ймовірнісно-статистичної надмірності. В умовах обробки прогнозно-залишкових блоків виявлення патернів ймовірнісно-статистичного походження залежить від особливостей структурно-семантичного змісту початкових відео блоків та точності побудови прогнозної моделі. Звідси складнощі можуть бути зумовлені:

- 1) по-перше неоднорідним структурним змістом відео блоків;
- 2) по-друге це неадекватністю прогнозної моделі.

Крім того, у разі обробки блоків в режимі Inter з врахуванням вектору руху динамічних об'єктів існують випадки втрати адекватності статистичних моделей формування прогнозу. Це зумовлено:

- помилками визначення вектору руху динамічних об'єктів; зміною структури, фону або масштабуванням об'єктів руху;
- неточністю початкового визначення об'єктів руху. В тому числі в режимі забезпечення енергоефективності, наприклад, в умовах обробки відеоданих для мобільних платформ, процес побудови вектору руху виключається із загального процесу обробки. Це призводить до зменшення можливостей щодо виявлення статистичних патернів в прогнозно-залишкових Inter-блоках. Тобто в цьому разі залишається високим рівень залишкової неоднорідності.

3. Потреба у додатковому залученні кодів контролю та виправлення помилок. Це зумовлено низькою стійкістю САВАС-кодів щодо впливу каналних завад в процесі декодування. Відповідно такі особливості призводять до втрати рівня стиснення або цілісності.

4. Зменшується потенціал виявлення статистичних патернів з можливістю скорочення потрібної кількості надмірності в яскравісно-

часовому просторі. Тобто потрібно використовувати ДКП-трансформацію. Таке може бути критичним у разі обробки відеоданих з використанням інфокомунікаційних технологій мобільних платформ.

Напрямок виходу з таких ситуацій може бути пов'язано з використанням альтернативного підходу, який базується на можливості виявити патерни для блоків $X(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$ в умовах обмеженості статистичних залежностей. Одним з варіантів тут може бути виявлення структурних залежностей. При цьому потрібно враховувати те, що згідно загальної концепції обробки відеоданих в HEVC-системі, прогнозно-залишкові блоки трансформуються до спектрального ДКП-простору. Звідси важливим є створення можливості для виявлення структурних залежностей в спектральному просторі. При цьому такі залежності мають мати стійку властивість для прогнозно-залишкових блоків різного рівня складності в умовах застосування режимів квантування спектрального простору.

Базовим варіантом для врахування структурних залежностей є використання обмежень на діапазони зміни значень в діагональних послідовностей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ спектрального простору $Q_{\tau}^{(\ell)}$ [6; 45; 116]. В якості додаткових патернів пропонується використовувати неоднорідності першого порядку. Вони стосуються наявності нерівності між сусідніми елементами $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$, $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ послідовності $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$.

$$\forall q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} \in Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} : q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}. \quad (2.3)$$

Тут

$Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ - ξ -а транс-діагональ поточного прогнозно-залишкового блоку в спектральному просторі (трансформанти) τ -го кадру в ℓ -му режимі передбачення. Транс-діагональ $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ розкладається на квант-компоненти наступним чином:

$$Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \{ q(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; \dots; q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}; \dots; q(\tau)_{n_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \},$$

де $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ - χ -а квант-компонента ξ -ї транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ прогнозно-залишкового блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$ в спектральному просторі (квантований транс-блок);

n_{ξ} - довжина ξ -ї транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$.

В загальному випадку довжина n_{ξ} ξ -ї транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ визначається виразом:

$$n_{\xi} = 2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi + 1)) - (-\text{sign}(n - \xi + 1)) \cdot \xi. \quad (2.4)$$

За аналізом виразу (2.4) слідує, що довжини транс-діагоналей для трансформційного блоку будуть нерівномірними за довжиною (рис. 2.1).

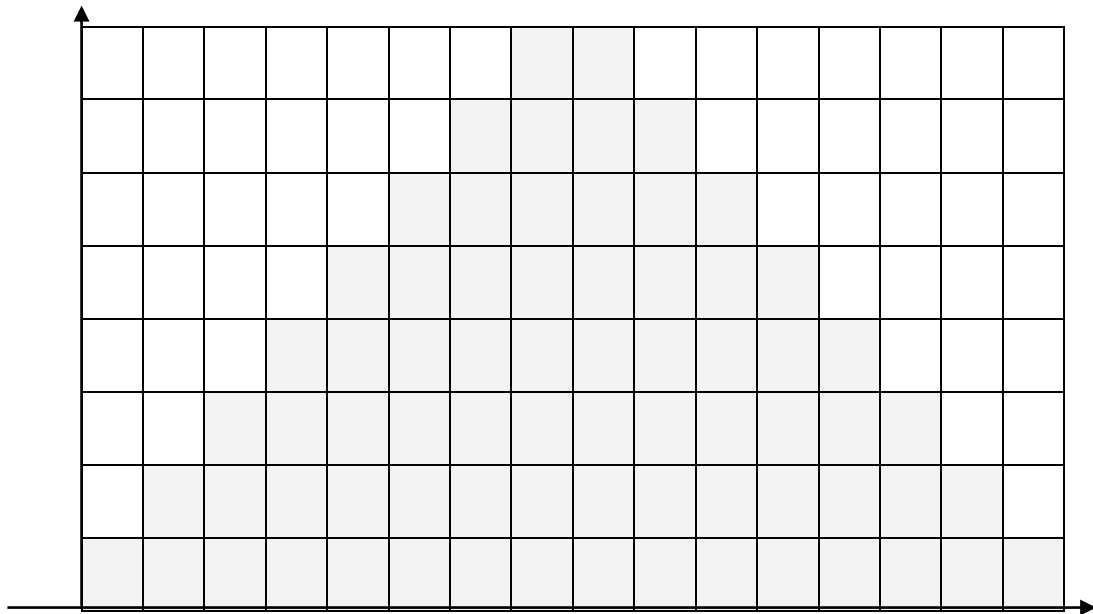


Рисунок 2.1. – Варіаційний ряд (піраміда) для довжин транс-діагоналей,
 $n=8$

Для математичного опису та розробки методу кодування транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ потрібно представити координати $\{\xi; \chi\}$ їх елементів $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ через координати $\{i; j\}$ в початковій рівномірній системі. Тобто форматування координат в загальному випадку описується виразом:

$$i = \varphi_i(\xi; \chi; n); \quad j = \varphi_j(\xi; \chi; n).$$

Тут $\varphi_i(\xi; \chi; n)$, $\varphi_j(\xi; \chi; n)$ - форматні функціонали для визначення відповідно тих координат i та j квант-компонент, які дозволяють індексувати необхідний χ -й елемент ξ -й транс-діагоналі.

В загальному таке форматування позначається, як перехід від рівномірно-двовимірної системи (РДС) до нерівномірно-діагональної.

Знаходження координат i та j квант-компонент в РДС-системі для заданих координат $\{\xi; \chi\}$ компонент $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ в ξ -й транс-діагоналі задається наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \varphi_i(\xi; \chi; n) &= \begin{cases} \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \end{cases} \\ \varphi_j(\xi; \chi; n) &= \begin{cases} \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \end{cases} \\ \theta &= n - \xi. \end{aligned} \tag{2.5}$$

З рахуванням таких виразів матимемо співвідношення для формування транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ за компонентами $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$, тобто:

$$q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} q(\tau)_{\xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1))}, & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ q(\tau)_{\chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1))}, & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0, \end{cases} \tag{2.6}$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}; \quad \chi = \overline{1, n_\xi}.$$

Отже в загальному випадку прогнозно-залишковий блок $Q_\tau^{(\ell)}$ в спектральному просторі буде описуватись сукупністю транс-діагоналей $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$. Тоді маємо:

$$Q_\tau^{(\ell)} = \{ Q_\tau^{(\ell, 1)}; \dots; Q_\tau^{(\ell, \xi)}; \dots; Q_\tau^{(\ell, 2n-1)} \}.$$

Кількість v транс-діагоналей залежить від лінійного розміру n прогнозно-залишкового блоку $Q_\tau^{(\ell)}$, та дорівнює:

$$v = 2n - 1.$$

Індексація діагоналей **здійснюється** в напрямку починаючи з верхнього лівого куту до нижнього правого кута транс-блоку [6; 116]. Отже транс-діагональ з індексом $\xi=1$ буде розташована в верхньому лівому куті трансформаційного блоку $Q_\tau^{(\ell)}$.

Відповідно транс-діагональ з найбільшим індексом $\xi=2n-1$ позиціонується в його нижньому правому куті.

У разі, якщо виконується умова (2.3), то враховується нерівність на глибину лише одного елементу. В цьому випадку такі послідовності визначаються, як послідовності з неоднорідністю першого порядку. Врахування таких патернів одночасно з виявленням обмежень на діапазон можливих значень елементів блоку дозволить скоротити кількість надмірності. Це зумовлено тим, що комбінаторна конфігурація трансформанти має більш адекватний опис у разі обліку її структурно-топологічних особливостей за діагональною текстурою. Тобто структурно-топологічні особливості спектрального простору трансформанти мають переважно **діагональну текстуру**.

В той же час в загальному випадку для трансформант прогнозно-залишкових блоків залежність (2.3) може бути відсутньою в явному вигляді. Тому необхідно забезпечити наявність стійких особливостей щодо виконання умови (2.3) для діагональних послідовностей спектральних блоків, в тому числі в умовах застосування різних режимів квантування.

Для цього пропонується розробити метод генерації неоднорідностей першого порядку, тобто наявність послідовностей з нерівностями між елементами першого порядку.

За викладеним матеріалом можна заключити:

- обґрунтовано наявність недоліків системи HEVC-стиснення, що зумовлені обмеженістю щодо: адекватності прогнозних моделей; точності моделей визначення об'єктів руху; точності визначення векторів руху динамічних об'єктів в послідовності кадрів; ефективності цілочисельного двійкового арифметичного кодування;

- обґрунтовано твердження відносно того, що для нерівномірно-діагонального формату трансформанти виникає потенційна спроможність відносно усунення додаткової кількості структурно-комбінаторної надмірності. При цьому кількість такої надмірності не впливає на втрату синтаксичної та семантичної цілісності відеосегменту. Це зумовлено тим, що комбінаторна конфігурація трансформанти має більш адекватний опис у разі обліку її структурно-топологічних особливостей за діагональною текстурою. Тобто структурно-топологічні особливості спектрального простору трансформанти мають переважно *діагональну текстуру*;

- обґрунтовано підхід для підвищення ефективності функціонування систем стиснення з технологією компенсації руху на основі виявлення стійких структурно-спектральних патернів за умовою неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей спектрального простору прогнозно-залишкових блоків.

2.2. Розробка методу квантування з формуванням стійких структурних патернів за неоднорідністю першого порядку

Пропонується створювати властивість щодо наявності стійких структурних патернів за неоднорідністю першого порядку в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків $Q_{\tau}^{(\ell)}$.

Найбільш частіше стратегія квантування будується так, що відповідні параметри мають стаціонарний характер в межах обробки елементів окремої транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Тут мається на увазі те, що значення функції $\varphi_{qu}(\rho, \xi, \chi)$ квантування для елементів $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ є однаковими. Це обґрунтовує підхід до формування стійких структурних патернів саме для транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ спектрального простору прогнозно-залишкових блоків [6].

Неоднорідність першого порядку для елементів $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ стосується виконання умови нерівності значень сусідніх елементів, тобто $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. Така умова з врахуванням особливостей форматування спектрального простору за діагонально-неоднорідним принципом матимемо наступний опис:

$$\left\{ \begin{array}{l} q(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)), (\chi-1)+\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)} \neq \\ \neq q(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)), \chi+\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ q(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)), \xi-\chi+2-\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)} \neq \\ \neq q(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)), \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)} \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}; \quad \chi = \overline{1, n_{\xi}}.$$

Формування властивостей типу «неоднорідності першого порядку» для транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ пропонується організовувати на основі врахування інформації про дві компоненти $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ та $s(i, j)_{\tau}^{(\ell)}$.

Першою компонентою є елемент поточної ξ -ї транс-діагонали, який передуює елементу $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$, з врахуванням її порядку індексації. Тобто:

$$q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} q(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)), (\chi-1)+\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ q(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)), \xi-\chi+2-\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

Така компонента потрібна для визначення наявності умови нерівності між елементами $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ та $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$. У разі, якщо така умова виконується, тобто $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$, то модифікація значення квант-компоненти $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ не здійснюється. Для селекції таких випадків пропонується використовувати функціонал:

$$(1 - |\text{sign}(q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})|) = \begin{cases} 0, \rightarrow q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}; \\ 1, \rightarrow q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Навпаки, коли між такими елементами виконується умова рівності значень, тобто $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$, то необхідно проводити модифікацію квант-компоненти $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. Означену модифікацію пропонується організовувати в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. При цьому необхідно врахувати умову (потребу) щодо зменшення втрат цілісності даних та створення умов для додаткового скорочення бітового об'єму.

Зменшення рівня цілісності даних виникає за рахунок переформатування додатних раціональних чисел $\frac{s'(i, j)_\tau^{(\ell)}}{\lambda(i, j)}$ до цілочисельних

$$\left[\frac{s'(i, j)_\tau^{(\ell)}}{\lambda(i, j)} \right]:$$

$$\frac{s'(i, j)_\tau^{(\ell)}}{\lambda(i, j)} \rightarrow \left[\frac{s'(i, j)_\tau^{(\ell)}}{\lambda(i, j)} \right],$$

де $[\alpha]$ - операція залишення лише цілого числа від раціонального α шляхом відкидання чисел після коми.

В цьому випадку виникають спотворення зумовлені формуванням квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$. Тоді відновленні (пост-квантові) значення $\tilde{s}(i, j)_\tau^{(\ell)}$

$$\tilde{s}(i, j)_\tau^{(\ell)} = \lambda(i, j) \cdot q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \quad (2.9)$$

на основі величини $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ можуть відрізнятися від перед-квантованих $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$.

Різниця між значеннями елементів $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$ та $\tilde{s}(i, j)_\tau^{(\ell)}$ визначається величиною залишку $s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}$. Тоді величину $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$ можна представити таким математичним записом:

$$s(i, j)_\tau^{(\ell)} = \tilde{s}(i, j)_\tau^{(\ell)} + s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)} = \lambda(i, j) \cdot q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} + s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}. \quad (2.10)$$

Тут операція $s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}$ визначається наступним чином:

$$s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)} = s(i, j)_\tau^{(\ell)} - \left[\frac{s(i, j)_\tau^{(\ell)}}{\lambda(i, j)} \right] \cdot \lambda(i, j).$$

Звідси потрібно формувати таке модифіковане значення $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$, для якого забезпечується найменше значення наступної різниці $\delta(i, j)$:

$$\delta(i, j) = |s(i, j)_\tau^{(\ell)} - \tilde{s}'(i, j)_\tau^{(\ell)}|.$$

Тут

$\tilde{s}'(i, j)_\tau^{(\ell)}$ - пост-квантове (відновлене) значення $(i; j)$ -го елементу прогнозно-залишкового блоку в спектральному просторі з використанням модифікованого значення квант-компоненти $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$;

$s(i, j)_\tau^{(\ell)}$ - перед-квантове (до квантування) значення $(i; j)$ -го елементу прогнозно-залишкового блоку в спектральному просторі;

Отже другою компонентою, інформація про яку використовується в процесі формування умови неоднорідності першого порядку, є значення перед-квантового елементу $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$

З врахуванням виразу (2.9) величина $\delta(i, j)$ буде дорівнювати:

$$\delta(i, j) = |s(i, j)_\tau^{(\ell)} - \lambda(i, j) \cdot q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}|$$

Водночас величина $s(i, j)_\tau^{(\ell)}$ знаходиться за формулою (2.10), тоді для $\delta(i, j)$ матимемо:

$$\begin{aligned} \delta(i, j) &= |\lambda(i, j) \cdot q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} + s(i, j)_\tau^{(\ell)} (\bmod \lambda(i, j)) - \lambda(i, j) \cdot q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}| = \\ &= |\lambda(i, j) \cdot (q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) + s(i, j)_\tau^{(\ell)} (\bmod \lambda(i, j))| \end{aligned}$$

Звідси для заданого елементу $\lambda(i, j)$ квант матриці мінімальне значення $\delta(i, j)$, $\delta(i, j) \rightarrow \min$, досягатиметься за умов мінімальної різниці між елементами $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ та $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$. Зрозумілим є те, що мінімальне

значення такої величини буде досягатися у разі корекції (модифікації) квант-компонент $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ на 1. Тому:

$$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \pm 1.$$

Або з обліком ситуації щодо наявної рівності між сусідніми квант-компонентами, тобто $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ маємо такий вираз:

$$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \pm (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})).$$

Звідси для величини $\delta(i, j)$ можливими будуть два значення $\delta(i, j)_-$ та $\delta(i, j)_+$:

$$\begin{aligned} \delta(i, j)_- &= |s(i, j)_\tau^{(\ell)} - \lambda(i, j) \cdot (q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - 1)| = \\ &= \lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})) + s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}; \\ \delta(i, j)_+ &= |s(i, j)_\tau^{(\ell)} - \lambda(i, j) \cdot (q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} + 1)| = \\ &= \lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})) - s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}. \end{aligned}$$

Тут потрібно також зауважувати на те, що вибір варіанту модифікації залежатиме від поточних значень квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$.

Пороговими варіантами тут є випадки, коли:

1) значення квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ дорівнює 0, $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = 0$. Це є критичним для вибору першого варіанту модифікації;

2) значення квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ дорівнює найбільш допустимому значенню 2^M згідно встановленої довжини M машинного слова, $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = 2^M$. Це є критичним відповідно для обрання другого варіанту модифікації.

Проведення модифікації за критичних умов призводить до неконтрольованої втрати рівня цілісності відеоданих.

Тому для уникнення таких ситуацій пропонується використовувати фільтруючі функціонали φ_- , φ_+ . Вони відповідно для наведених випадків мають вигляд:

$$\varphi_- = \text{sign } q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} 0, \rightarrow q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = 0; \\ 1, \rightarrow q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} > 0; \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\varphi_+ = \text{sign } (2^M - q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) = \begin{cases} 0, \rightarrow q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = 2^M; \\ 1, \rightarrow q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} < 2^M; \end{cases} \quad (2.12)$$

За обліком чого функціонал обрання варіанту модифікації квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ задається таким математичним записом:

$$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \underset{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}}{\text{argument}} \{ \min \{ \varphi_- \cdot \delta(i, j)_- ; \varphi_+ \cdot \delta(i, j)_+ \}$$

або

$$\begin{aligned} q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \underset{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}}{\text{argument}} \{ & \min \{ \text{sign } q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \times \\ & \times (\lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign } (q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) + s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)})) ; \\ & \text{sign } (2^M - q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) \times \\ & \times \lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign } (q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) - s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}) \} \}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Особливим випадком є варіант, коли виконується рівність між значеннями $\delta(i, j)_-$ та $\delta(i, j)_+$. В цьому разі для створення умов щодо зниження бітового об'єму пропонується обирати варіант з меншим значенням модифікованої квант-компоненти $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$. Тобто

$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - 1$. Для селекції такого варіанту пропонується додатково використовувати функціонал φ_- :

$$\varphi_- = \text{sign}(\delta(i, j)_+ - \delta(i, j)_-) = \begin{cases} 0, & \rightarrow \delta(i, j)_+ = \delta(i, j)_-; \\ 1, & \rightarrow \delta(i, j)_+ > \delta(i, j)_-. \end{cases} \quad (2.14)$$

Тоді остаточно матимемо таке співвідношення для знаходження модифікованого значення $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ квант-компоненти ξ -ї транс-діагоналі спектрального простору прогнозно-залишкового блоку щодо формування умови неоднорідності першого порядку.

$$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \arg \text{ument} \left\{ \min_{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}} \{ \varphi_- \cdot \delta(i, j)_-; \varphi_- \cdot \varphi_+ \cdot \delta(i, j)_+ \} \right.$$

В загальному варіанті з обліком ситуації щодо наявної рівності між сусідніми квант-компонентами, тобто $q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ маємо такий вираз:

$$\begin{aligned} q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \arg \text{ument} \left\{ \min_{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}} \{ \text{sign } q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \times \right. \\ \times (\lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) + s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)})) ; \\ \left. \text{sign}(\delta(i, j)_+ - \delta(i, j)_-) \cdot \text{sign}(2^M - q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) \times \right. \\ \left. \times \lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) - s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}) \} \right\}. \quad (2.15) \end{aligned}$$

При цьому необхідно зауважити стосовно того, що координати (i, j) визначаються з використанням системи (2.5):

$$i = \varphi_i(\xi; \chi; n); \quad j = \varphi_j(\xi; \chi; n)$$

для заданих значень:

ξ - індексу транс-діагоналі спектрального простору прогнозно-залишкового блоку;

χ - індексу квант-компоненти в транс-діагоналі.

В результаті чого, матимемо послідовності на базі транс-діагоналей, для сусідніх елементів $q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ та $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ якої буде виконуватись умова нерівності (2.7), $q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. При цьому за таких умов формуються стійкі структурні патерні. Це може використовуватися для скорочення кількості структурно-спектральної надмірності в процесі кодування.

За результатами матеріалу досліджень можна заключити наступне:

1) розроблено метод встановлення стійких спектрально-структурних патернів для транс-діагональних послідовностей в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Метод базується на досягненні умови неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей в процесі квантування на основі аналізу інформації за двома компонентами: квант-компоненти, що передують поточній у транс-діагоналі; перед-квантове значення поточної компоненти транс-діагоналі. При цьому враховується нерівномірно-діагональний формат індексації спектрального простору прогнозно-залишкових блоків;

2) обґрунтовано те, що процес встановлення умови неоднорідності першого порядку не вносить додаткових спотворень (не призводить до додаткових втрат цілісності). При цьому корекції значень квант-компонент проводяться в межах рівня спотворень, який зумовлено процесом квантування трансформант прогнозно-залишкових блоків. Передбачається можливість для додаткового зниження діапазону можливих значень квант-компонент, що створює умову для збільшення рівня стиснення відеоданих.

Наукова новизна.

Вперше створено метод квантування на основі двокомпонентного інформативного аналізу. Відмінності методу стосуються того, що процес дискретизації спектрального простору здійснюється на основі додаткового врахування інформації щодо стану попереднього елемента діагоналі та початкового значення поточного елемента 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).

2.3. Створення математичної моделі щодо визначення рівня інформативності прогнозно-залишкових блоків на основі структурування їх спектрального простору

З врахуванням якісних та кількісних властивостей спектрального простору прогнозно-залишкових блоків можна виділити підходи стосовно встановлення обмежень на конфігурацію компонент в трансформанті. Такі обмеження зумовлені особливостями формування трансформант для прогнозно-залишкових блоків з використанням дискретного косинусного перетворення. Вони стосуються того, що [6; 8]:

- топологія розташування базисних функцій ДКП-перетворення має певно-визначений порядок розміщення (кількість гармонік в для послідовності функцій косинусу збільшується в напрямку зверху – до низу);
- кількість інформації, яку містять компоненти трансформанти в різних її ділянках, про структурно-статистичний та просторово-яскравісний зміст початкового відео блоку є нерівномірною. Тобто позначається топологія, яка має диференційний характер;
- спектральні компоненти в різних ділянках трансформанти мають нерівно-ваговий вплив на збереження цілісності відео блоку (нерівно-вагова

інформативне навантаження, яке розподіляється за компонентами в різних ділянках трансформанти).

Звідси стосовно структурно-топологічного характеру трансформанти можна заключити наступне:

- окреслюється неоднорідність діапазону зміни значень спектральних компонент в різних ділянках трансформанти. А, саме ділянки низьких та високих частот трансформанти;
- виступає топологічна тенденція зменшення спектральних діапазонів за зігзаго-образним напрямком
- проявляється наявність таких структурних ознак, як серії компонент з нульовими значеннями.

Тому стверджується такий аспект. Розташування компонент за їх інформативною вагою та вибір їх значень в трансформанті здійснюється за певними правилами та має певні топологічні та структурні особливості. Отже накладаються обмеження щодо можливих вибірок відносно формування змісту трансформанти. Таким чином, для трансформанти ДКП утворюється комбінаторна конфігурація. А саму трансформанту можна в загальному випадку розглядати як комбінаторний об'єкт.

Означений підхід щодо інтерпретації трансформанти створює умови для скорочення структурно-комбінаторної та психовізуально-комбінаторної надмірностей. Такі визначення обумовлені походженням комбінаторної трактовки трансформанти.

Рівень інформативності трансформанти з позиції структурно-комбінаторного та психовізуально-комбінаторного підходів визначається кількістю допустимих комбінаторних конфігурацій, які можна побудувати з її компонент.

Означені обмеження на можливі зміни значень квант-компонент $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ в транс-діагоналях трансформанти $Q_{\tau}^{(\ell)}$ прогнозно-залишкового блоку визначаються шляхом знаходження відповідних діапазонів $r(\tau)^{(\ell, \xi)}$. З

врахуванням нерівномірно-діагонального формату трансформанти величини $r(\tau)^{(\ell, \xi)}$ знаходяться за окремими транс-діагоналями $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$. Тоді маємо вираз:

$$r(\tau)^{(\ell, \xi)} = \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}\} + 1. \quad (2.16)$$

Тут $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ - χ -а квант-компонента ξ -ї транс-діагонали трансформанти $Q_\tau^{(\ell)}$ прогнозно-залишкового блоку; n_ξ - довжина ξ -ї діагонали трансформанти.

Дане співвідношення в умовах особливостей формування значень $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ матиме такий вигляд:

$$r(\tau)^{(\ell, \xi)} = \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}\} + 1;$$

$$r(\tau)^{(\ell, \xi)} = 1 + \begin{cases} \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{q'(\tau)_{\xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1))\}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{q'(\tau)_{\chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1))\}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0, \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}.$$

Тут компонента $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ є модифікацією квант-компоненти $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ для досягнення умови щодо неоднорідності першого порядку. Величина $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ в загальному випадку знаходиться за формулою:

$$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \underset{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}}{\text{argument}} \{ \min \{ \varphi_- \cdot \delta(i, j)_-; \varphi_- \cdot \varphi_+ \cdot \delta(i, j)_+ \} \}.$$

Вираз (2.17) забезпечує встановлення діапазону (розмаху) зміни значень модифікованих квант-компонент $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ для кожної окремої ξ -ї

транс-діагоналі спектрального простору прогнозно-залишкового блоку.

Обмеженість діапазону можливих значень обґрунтовується наступним:

- по-перше, обмеженістю розмаху значень елементів прогнозно-залишкового блоку відносно нульового рівня;
- по друге, перерозподілом значень в бік низькочастотних компонент спектрального простору та процесом його квантування.

Однак, потрібно зауважити, що при цьому ще не враховується наявна умова щодо неоднорідності першого порядку.

Для одночасного прийняття такої умови потрібно обліковувати обмеження на діапазон модифікованих квант-компонент $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. Таке спричиняється умовою (2.3) щодо нерівності значень суміжних квант-компонент транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, $q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. Оскільки неоднорідність стосується лише суміжних компонент, то величина $r(\tau)^{(\ell, \xi)}$ діапазону можливих значень буде додатково зменшуватися. Тоді величина $r(\tau)^{(\ell, \xi)}$ з одночасним врахуванням двох типів обмеженості буде залежати від індексу квант-компонент в транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. У разі узагальнення матимемо [6; 8]:

$$r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)} - \text{sign}(1 - \chi) = \max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}\} + 1 - \text{sign}(1 - \chi). \quad (2.18)$$

де $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ - розмах можливих значень за умов обробки квант-компоненти на першій позиції транс-діагоналі;

$r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ - розмах можливих значень для транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ з врахуванням індексів χ квант-компонент;

$\text{sign}(1 - \chi)$ - функціонал корекції розмаху можливих значень в залежності від позиції χ квант-компоненти в транс-діагоналі:

$$\text{sign}(1-\chi) = \begin{cases} 0, \rightarrow \chi = 1 \text{ \& } r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; \\ 1, \rightarrow \chi \geq 2 \text{ \& } r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)} - 1. \end{cases}$$

З врахуванням даного співвідношення та додаткової умови щодо неоднорідності першого порядку матимемо наступний вираз для визначення величин $r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ [6; 8]:

$$r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)), \chi+\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)) }^{(\ell, \xi)} \} + \\ + 1 - \text{sign}(1-\chi), \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)), \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1-\text{sign}(\theta+1)) }^{(\ell, \xi)} \} + \\ + 1 - \text{sign}(1-\chi), \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}.$$

Отже створено математична модель, що представляється співвідношенням (2.19), та дозволяє оцінити розмах можливих значень квант-компонент в залежності від їх індексу в транс-діагоналі з врахуванням двох типів обмежень (обмеження квантово-спектрального простору прогнозно-залишкових блоків та обмеження згідно умови неоднорідності першого порядку) та нерівномірно-діагонального опису трансформанти.

Розробимо тепер математичну модель для оцінювання кількості інформації $I_\tau^{(\ell, \xi)}$, $I_\tau^{(\ell)}$, що міститься відповідно в:

- окремій ξ -й транс-діагоналі $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$;
- усьому прогнозно-залишковому блоці $Q_\tau^{(\ell)}$ у спектральному просторі.

При цьому будемо враховувати умови визначення величин $r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$, які знаходяться за виразом (2.19).

Для знаходження величин $I_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, $I_{\tau}^{(\ell)}$ пропонується враховувати комбінаторну конфігурацію трансформанти, яка обумовлена її структурними та психовізуальними особливостями шляхом встановлення діапазонів $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. Для цього пропонується використовувати таку категорію комбінаторики, як перестановка із повтореннями з обмеженнями на діапазони зміни значень її елементів.

Перестановка з повтореннями має наступні ознаки [6; 8; 45]:

- з одного боку враховує як позиції так й самі значення компонент в трансформанті;
- з іншого боку кількість допустимих перестановок з повтореннями залежить від діапазонів значень, які приймають її компоненти.

Врахування позицій компонент в трансформанті є необхідним, оскільки вони визначають область низьких та високих частот спектрального простору. Врахування обмежень на діапазон зміни значень компонент потрібно для обліку нерівномірності спектрального діапазону в різних ділянках трансформанти.

Згідно чого кількість $P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ таких перестановок, що є допустимими в умовах розгляду відповідно окремої транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ прогнозно-залишкового блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$ у спектральному просторі, дорівнюватиме:

$$P_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)), \chi+\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)) } \} + \right. \\ \left. + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)), \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)) } \} + \right. \\ \left. + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}.$$

(2.20)

Для спрощення математичного запису виразу (2.20) застосуємо позначення для функціоналу $\text{sign}(1 + \text{sign}((n - \xi) - 1))$. Цей функціонал визначає позицію ξ -ї транс-діагоналі відносно областей низьких та високих частот трансформанти прогнозно-залишкового блоку. Тобто:

$$\text{sign}(1 - \text{sign}((n - \xi) + 1)) = \begin{cases} 0, & \rightarrow \xi \leq n; \\ 1, & \rightarrow \xi > n. \end{cases}$$

Звідси пропонується використовувати таке позначення:

$$\text{pos}_\xi = \text{sign}(1 + \text{sign}((n - \xi) - 1)). \quad (2.21)$$

Тоді для системи виразів (2.20) матимемо:

$$P_\tau^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \prod_{\chi=1}^{n_\xi} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \prod_{\chi=1}^{n_\xi} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}.$$

Це співвідношення дозволяє визначити кількість допустимих комбінацій, що можна скласти для послідовності на базі структурних особливостей ξ -ї транс-діагоналі. До таких особливостей відноситься:

n_ξ - кількість елементів в ξ -й діагоналі;

величина $r(\tau)^{(\ell, \xi)}$ обмеження на розмах можливих значень з врахуванням умови неоднорідності першого порядку;

координати ξ поточної транс-діагоналі в трансформанті прогнозно-залишкового блоку).

Кількість $I_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ інформації в ξ -й транс-діагоналі пропонується оцінювати шляхом врахування кількості станів, які можуть статися за умов наявності наступних обмежень на значення її структурованих квант-компонент $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$:

$$q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} \leq \begin{cases} \max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)) \} + \\ + 1 - \text{sign}(1 - \chi), \quad \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)) \} + \\ + 1 - \text{sign}(1 - \chi), \quad \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0. \end{cases} \quad (2.22)$$

З врахуванням чого, матимемо [6; 8; 45]:

$$I_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \chi + \theta \cdot \text{pos}_{\xi}} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi + \theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{pos}_{\xi}} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases} \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}. \quad (2.23)$$

На основі виразу для визначення кількості $I_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ інформації в окремих транс-діагоналях $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ з'являється можливість щодо знаходження рівня $I_{\tau}^{(\ell)}$ інформативності для всього прогнозно-залишкового (ПЗ) блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$ у спектральному просторі. Для цього потрібно врахувати те, що кількість інформації в транс-діагоналях ПЗ-блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$, здійснюється незалежно одна від іншої. Тоді для величини $I_{\tau}^{(\ell)}$ маємо використовувати наступну систему співвідношень:

$$I_{\tau}^{(\ell)} = \begin{cases} \sum_{\xi=1}^{n-1} \log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \sum_{\xi=1}^{n-1} \log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases} \quad (2.24)$$

Отже співвідношення (2.18) – (2.24) утворюють математичну модель для оцінювання кількості інформації (рівня інформативності) в транс-діагоналях та прогнозно-залишковому блоці у структурованому спектральному просторі за обліком таких умов:

1) трансформанта будується для прогнозно-залишкових блоків з використанням дискретного косинусного перетворення. При цьому прогнозно-залишкові блоки утворюються з врахуванням одного з двох режимів передбачення: режим Intra-екстраполяції ($\ell=1$); режим формування прогнозової моделі за Inter-обробкою ($\ell=2$);

2) для ПЗ-блоку в процесі квантування його спектрального простору забезпечується наявність стійкого структурно-спектрального патерну щодо неоднорідності першого порядку для структурованих квант-компонент транс-діагоналей. При цьому значення структурованих квант-компонент знаходяться за формулою:

$$q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} = \arg \min_{q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}} \{ \varphi_{-} \cdot \delta(i, j)_{-}; \varphi_{-} \cdot \varphi_{+} \cdot \delta(i, j)_{+} \};$$

3) для значень квант-компонент транс-діагоналей виконується обмеження на діапазон можливих значень в залежності від їх позиції з врахуванням умови неоднорідності першого порядку, що описується системою виразів (2.22);

4) система індексації прогнозно-залишкових блоків у спектральному просторі відповідає нерівномірно-діагонального формату;

5) передбачається, що визначення кількості інформації в ПЗ-блоці у *структурованому* спектральному просторі визначається з врахуванням рівня інформативності окремих транс-діагоналей.

На основі представлених результатів досліджень можна заключити. Розроблена математична модель для оцінювання кількості інформації в послідовностях нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків за обліком наступних особливостей:

1) трансформанта будується для прогнозно-залишкових блоків в режим Intra та Inter передбачення з використанням дискретного косинусного перетворення;

2) для ПЗ-блоку в процесі квантування його спектрального простору забезпечується наявність стійкого структурно-спектрального патерну щодо неоднорідності першого порядку для структурованих квант-компонент транс-діагоналей;

3) для значень квант-компонент транс-діагоналей виконується обмеження на діапазон можливих значень в залежності від їх позиції з врахуванням умови неоднорідності першого порядку. Обмеженість діапазону можливих значень обґрунтовується:

- обмеженістю розмаху значень елементів прогнозно-залишкового блоку відносно нульового рівня;
- перерозподілом значень в бік низькочастотних компонент спектрального простору та процесом його квантування;
- наявністю умови щодо нерівності першого порядку для структурованих квант-компонент;

4) система індексації прогнозно-залишкових блоків у спектральному просторі відповідає нерівномірно-діагонального формату;

5) передбачається, що визначення кількості інформації в ПЗ-блоці у **структурованому** спектральному просторі визначається з врахуванням рівня інформативності окремих транс-діагоналей.

Наукова новизна.

Вперше 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.

2.4. Побудова методу кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі для платформ стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів

Розглянемо процес створення технології кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкового блоку. В цьому разі вхідною (початковою) послідовністю є транс-діагональ $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ трансформанти $Q_{\tau}^{(\ell)}$ прогнозно-залишкового блоку. Послідовність $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ має такі особливості [6; 8; 45]:

1) позиціонується в двовимірному неоднорідно-діагональному структурованому спектральному просторі за індексом ξ , $\xi = \overline{1, 2n-1}$;

2) складається з модифікованих квант-компонент $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$

$$\begin{aligned}
q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = \arg \min_{q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}} \{ & \text{sign } q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \times \\
& \times (\lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) + s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)})) ; \\
& \text{sign}(\delta(i, j)_+ - \delta(i, j)_-) \cdot \text{sign}(2^M - q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) \times \\
& \times \lambda(i, j) \cdot (1 - \text{sign}(q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) - s(i, j)_\tau^{(\ell)} \pmod{\lambda(i, j)}) \} \},
\end{aligned}$$

та описується вектором: $Q_\tau^{(\ell, \xi)} = \{ q'(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; \dots; q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}; \dots; q'(\tau)_{n_\xi}^{(\ell, \xi)} \}$, з

нерівномірною довжиною n_ξ , $n_\xi = \text{var}$;

3) є комбінаторним об'єктом – перестановкою з повторенням з **додатковими обмеженнями на між елементні конфігурації**. Додаткові конфігурації стосуються наявності:

- обмеження на діапазон можливих значень в залежності від їх позиції, тобто:

$$q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \leq \begin{cases} \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

- умови щодо неоднорідності першого порядку. Це описується, так:

$$\begin{cases} q'(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi, (\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \neq q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ q'(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi, \xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \neq q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\text{pos}_\xi = \text{sign}(1 + \text{sign}((n - \xi) - 1)); \quad \theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}; \quad \chi = \overline{1, n_\xi}.$$

Тоді за наступних умов в формалізованому вигляді перетворення $F_{\text{encod}}^{(1)}(Q_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ на кодування послідовності $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ має наступний вигляд:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{\text{encod}}^{(1)}(Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}; r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}; n_{\xi}; \Omega_{\text{pat}}),$$

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} \in C_{\tau}^{(\ell)} \quad \text{та} \quad Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} \in Q_{\tau}^{(\ell)}.$$

Тут Ω_{pat} - множина закономірностей (pattern), які встановлюються для послідовностей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, та враховуються в процесі обробки для скорочення кількості надмірності й формування компресійної кодограми.

Відповідно до підходу, який лежить в основі визначення рівня інформативності в транс-діагоналях $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ пропонується:

1) трактувати послідовності $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, як структурно-зумовлені позиційні числа (SBPN) з обмеженнями $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$, $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ на діапазон зміни значень квант-компонент. В цьому випадку проявляється властивість «гальмування» (згасання) темпу зростання значення вагового коефіцієнту другої компоненти відносно ваги першої компоненти діагоналі. Це дозволяє врахувати комбінаторні конфігурації в процесі скорочення кількості відповідних видів надмірності;

- кількість SBP-чисел, які задовольняють встановленим для транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ обмеженням $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$, $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ знаходиться за допомогою виразу [6; 8; 43-45; 116]:

$$P_{\tau}^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)} \cdot \prod_{\chi=2}^{n_{\xi}} r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)} \cdot (r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)})^{n_{\xi}-1} \quad (2.25)$$

або

$$P_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right), \\ \quad \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi) \right), \\ \quad \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1},$$

де $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ - розмах можливих значень за умов обробки квант-компоненти на першій позиції транс-діагоналі;

$r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ - розмах можливих значень для транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ з врахуванням індексів χ квант-компонент;

$\text{sign}(1 - \chi)$ - функціонал корекції розмаху можливих значень в залежності від позиції χ квант-компоненти в транс-діагоналі.

Звідси для формування значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ пропонується здійснювати розробку систем кодування в класі усічено-позиційних кодових систем [6; 8; 44]. Відповідно до інтерпретації транс-діагоналей кодове значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ визначається, як індекс, що визначає його позицію в допустимій множині $\Omega_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Звідси величина $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ знаходиться за допомогою сумування нерівномірно-вагових складових $\Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Такі складові визначаються, як кількість допустимих SBP-чисел, що передують поточному числу (тобто поточній ξ -й транс-діагональній послідовності трансформанти ПЗ-блоку). Тому подалі нерівномірно-вагові складові кодового значення SBP-числа будемо визначати, як *інформативно-позиційна вага*. Отже маємо такий вираз, що визначає величину $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi=1}^{n_{\xi}} \Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}. \quad (2.26)$$

Тут значення вагового коефіцієнту $\Delta_\chi P_\tau^{(\ell, \xi)}$ для елементів SBP-числа (діагональної послідовності) $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$ знаходиться за допомогою такого співвідношення [8]:

$$\Delta_\chi P_\tau^{(\ell, \xi)} = q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot (r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})^{n_\xi - \chi} - (r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})^{n_\xi - \chi} \cdot \text{sign}(1 + \text{sign}(q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})), \quad (2.27)$$

Тоді маємо наступні співвідношення для знаходження коду $C_\tau^{(\ell, \xi)}$:

$$C_\tau^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi=1}^{n_\xi} \Delta_\chi P_\tau^{(\ell, \xi)} ;$$

$$\Delta_\chi P_\tau^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} (q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi - \\ - \text{dirhet}(q'(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, (\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi; q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi)) \times \\ \times (r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})^{2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi+1)) - (-\text{sign}(n - \xi+1)) \cdot \xi - \chi}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ (q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi - \\ - \text{dirhet}(q'(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, \xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi; q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi)) \times \\ \times (r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})^{2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi+1)) - (-\text{sign}(n - \xi+1)) \cdot \xi - \chi}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0. \end{cases} \quad (2.28)$$

Тут використовуються такі позначення:

- функціонал визначення напрямку неоднорідності (direction of heterogeneity) для значень двох суміжних компонент $q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ та $q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ транс-діагоналі трансформанти прогнозно-залишкового блоку [6; 8; 44]:

$$\text{dirhet}(q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; q'(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) =$$

$$= \begin{cases} \text{sign}(1 + \text{sign}(q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} - q'(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi, (\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \text{sign}(1 + \text{sign}(q'(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi, \xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} - q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

- функціонал pos_ξ включає до себе функцію $\text{sign}(\theta - 1)$, та задається наступним чином:

$$\text{pos}_\xi = \text{sign}(1 + \text{sign}((n - \xi) - 1)) = \begin{cases} 0, \rightarrow \xi \leq n; \\ 1, \rightarrow \xi > n; \end{cases}$$

$$\theta = n - \xi.$$

За узагальненням формуємо наступний вираз для знаходження величини $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ для довільного позиціонування транс-діагоналі відносно головної в залежності від напрямку її обходу в трансформованому прогнозно-залишковому блоці $Q_\tau^{(\ell)}$ (рис. 2.2):

1) у разі непарного значення індексу ξ поточної транс-діагоналі в трансформанті $Q_\tau^{(\ell)}$, тобто $\xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1$ [6; 8; 44]:

$$\begin{aligned} C_\tau^{(\ell, \xi)} &= \sum_{\chi=1}^{n_\xi} \Delta_\chi P_\tau^{(\ell, \xi)} = \\ &= \sum_{\chi=1}^{n_\xi} (q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} - \\ &\quad - \text{dirhet}(q'(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_\xi, (\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)}; q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi, \chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)})) \times \\ &\quad \times (r(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})^{2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi + 1)) - (-\text{sign}(n - \xi + 1)) \cdot \xi - \chi}; \end{aligned} \quad (2.29)$$

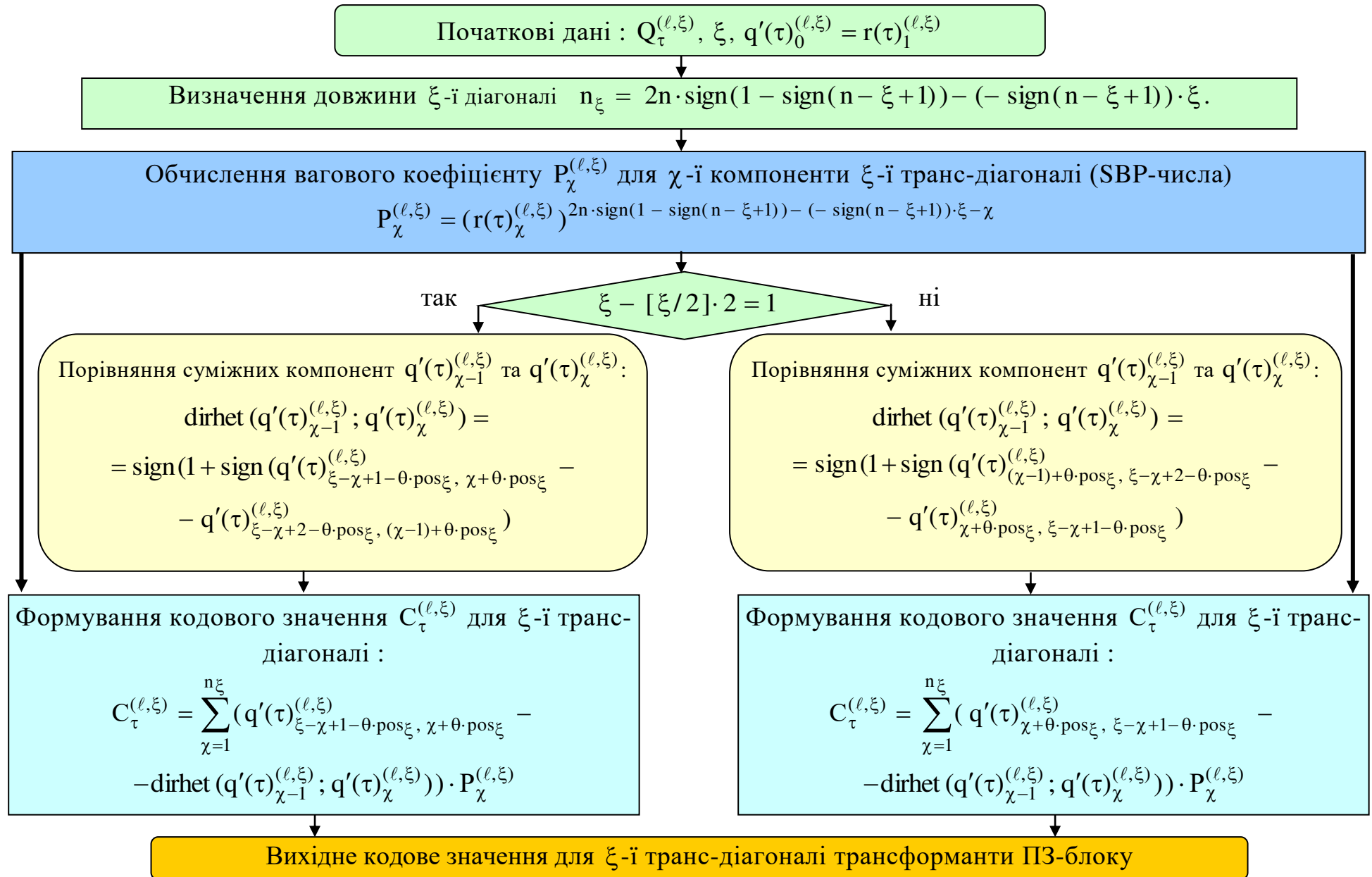


Рисунок 2.2. - Структурно-функціональна схема процесу кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі трансформанти ПЗ-блоку в структурно-зумовленому позиційному просторі

2) у разі парного значення індексу ξ поточної діагоналі в трансформанті, тобто $\xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0$ [6; 8; 44]:

$$\begin{aligned}
 E(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell, \xi)} &= \sum_{\chi=1}^{n_{\xi}} \Delta_{\chi} V(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \\
 &= \sum_{\chi=1}^{n_{\xi}} (q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)}, \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{pos}_{\xi} - \\
 &\quad - \text{dirhet}(q'(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)}, \xi - \chi + 2 - \theta \cdot \text{pos}_{\xi}; q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)}, \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{pos}_{\xi})) \times \\
 &\quad \times (r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)})^{2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi + 1)) - (-\text{sign}(n - \xi + 1)) \cdot \xi - \chi}. \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

Даний вираз дозволяє визначити величину $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ в незалежності від позиціонування поточної транс-діагоналі в двовимірній трансформанті ПЗ блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$. Завершення процесу визначення кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ досягається по результатам обробки останнього n_{ξ} -ї квант-компоненти ξ -ї транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Довжина n_{ξ} транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ обчислюється за формулою :

$$n_{\xi} = 2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi + 1)) - (-\text{sign}(n - \xi + 1)) \cdot \xi,$$

де n - лінійний розмір прогнозно-залишкового блоку в спектральному просторі.

Зауваження. Відносно визначення функціоналу $\text{dirhet}(q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)})$ на етапі обробки першого елементу $q'(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ SBP-чисел. Існує невизначеність щодо значення нульового (віртуального) елементу $q'(\tau)_0^{(\ell, \xi)}$. Тут потрібно врахувати те, що для першого елементу SBP-числа не накладаються додаткові обмеження відносно діапазону $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$

його значень. Для виключення такої невизначеності пропонується значення елементу $q'(\tau)_0^{(\ell, \xi)}$ встановлювати на рівні спектрального діапазону $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ першого елементу SBP-числа, тобто

$$q'(\tau)_0^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}.$$

В цьому випадку завжди буде забезпечуватись умова

$$q'(\tau)_1^{(\ell, \xi)} < q'(\tau)_0^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}.$$

А, отже, значення функціоналу $\text{dirhet}(q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)})$ в цьому випадку буде завжди дорівнювати 0. Дійсно, оскільки за умовами структурно-зумовленого позиційного кодування (SBPC) виконується нерівність

$$q'(\tau)_1^{(\ell, \xi)} \leq r(\tau)_1^{(\ell, \xi)} - 1.$$

Співвідношення (2.29), (2.30) дозволяють визначити кодове значення $E(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ для довільного позиціонування діагоналі або її компонент в двовимірному просторі трансформанти. Відповідна схематична інтерпретація таких властивостей наведена на рис. 2.3.

Отже величина $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ формується для транс-діагональної послідовності з одночасним врахуванням прив'язки координат її компонент (пірамідального формату) до двовимірного простору (рядково-стовпцовий формат).

При цьому реалізується функціональне перетворення $F_{\text{encod}}^{(1)}(Q_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ загального процесу формування компактного за бітовим описом синтаксичного представлення. На цьому етапі досягається скорочення кількості надмірності, яка зумовлена комбінаторними конфігураціями нерівномірно-діагонального опису трансформанти прогнозно-залишкового блоку.

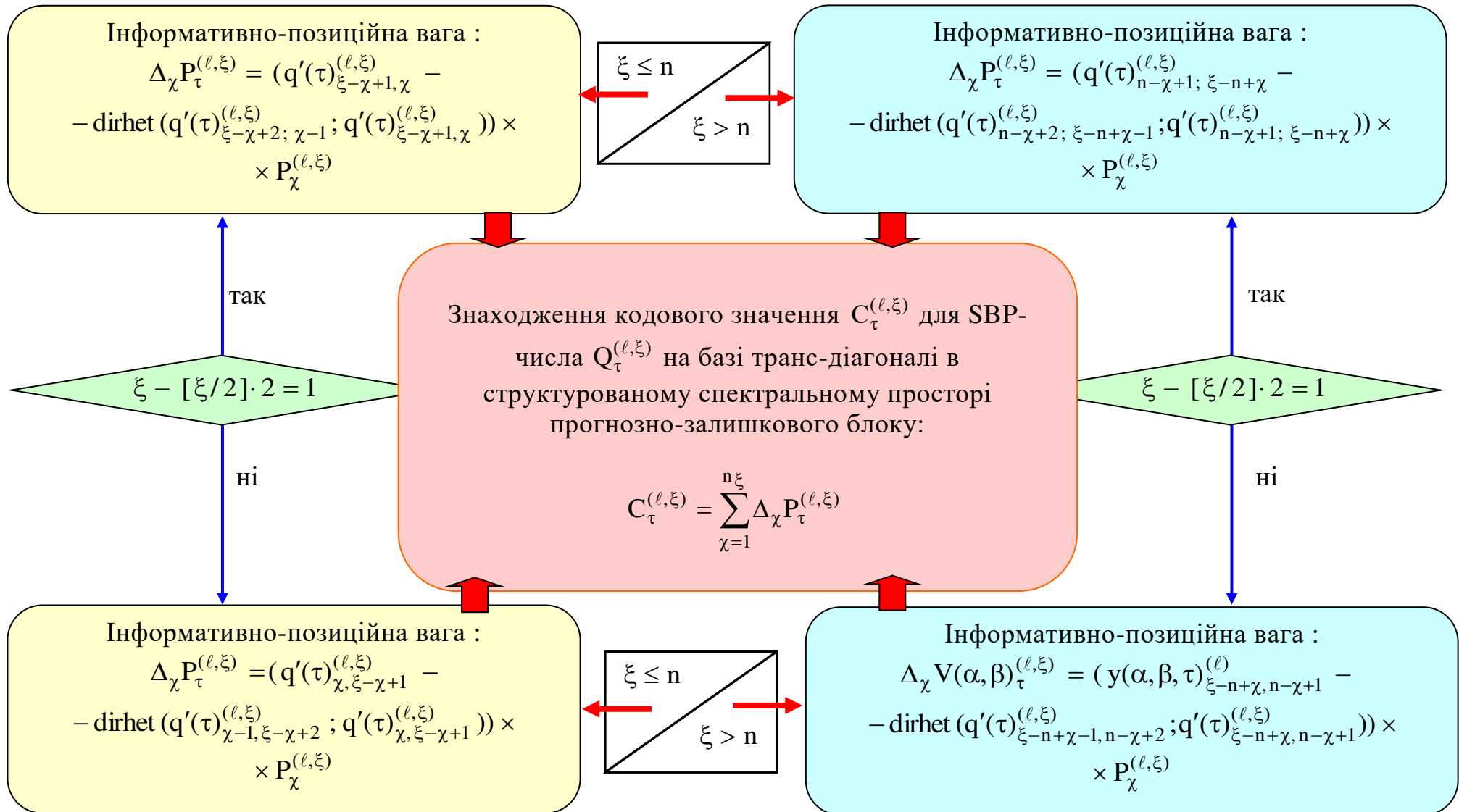


Рисунок 2.3. - Структурно-функціональна схема технології автоматичного переформатування квант-компонент транс-діагоналі в процесі структурно-зумовленого позиційного кодування в структурованому просторі трансформанти

За викладеним матеріалом щодо результатів досліджень можна заключити:

1. Розроблено метод структурно-зумовленого позиційного кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкового блоку. Це створює реалізацію базового етапу загальних функціональних перетворень щодо побудови компактного опису в системі стиснення з компенсацією руху об'єктів. Метод базується на :

1.1. Технології знаходження вагових коефіцієнтів елементів SBP-чисел. Тут в основі лежить процес визначення допустимої кількості послідовностей, які задовольняють наступним умовам щодо:

- передування поточній транс-діагональній послідовності;
- відповідності обмеженням на діапазони зміни значень квант-компонент;
- відповідності структурно-спектральному патерну щодо неоднорідності першого порядку.

1.2. Використанні функціоналу щодо визначення співвідношення між сусідніми елементами SBP-числа. Тут в основі лежить процес усунення кількості заборонених послідовностей, які виявляються на основі додаткового врахування співвідношення щодо напрямку неоднорідності між значеннями поточного та попереднього елементів SBP-числа.

2. Створений метод функціонує в двох режимах.

Перший режим. Для довільного розташування транс-діагоналі відносно головної без встановлення напрямку її обходу в процесі зігзагового розгортання трансформанти.

Другий режим. Для довільного розташування транс-діагоналі відносно головної з автоматичним визначенням напрямку її обходу в процесі зігзагового розгортання трансформанти

Наукова новизна.

Вперше 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.

Висновки за другим розділом

1. Розроблено метод встановлення стійких спектрально-структурних патернів для транс-діагональних послідовностей в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Метод базується на досягненні умови неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей в процесі квантування на основі аналізу інформації за двома компонентами: квант-компоненти, що передують поточні у транс-діагоналі; перед-квантове значення поточної компоненти транс-діагоналі. При цьому враховується нерівномірно-діагональний формат індексації спектрального простору прогнозно-залишкових блоків;

Наукова новизна.

Вперше 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. Розроблена математична модель для оцінювання кількості інформації в послідовностях нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків за обліком наступних особливостей:

1) трансформанта будується для прогнозно-залишкових блоків в режим Intra та Inter передбачення з використанням дискретного косинусного перетворення;

2) для ПЗ-блоку в процесі квантування його спектрального простору забезпечується наявність стійкого структурно-спектрального патерну щодо неоднорідності першого порядку для структурованих квант-компонент транс-діагоналей;

3) для значень квант-компонент транс-діагоналей виконується обмеження на діапазон можливих значень в залежності від їх позиції з врахуванням умови неоднорідності першого порядку.

4) система індексації прогнозно-залишкових блоків у спектральному просторі відповідає нерівномірно-діагонального формату;

5) передбачається, що визначення кількості інформації в ПЗ-блоці у *структурованому* спектральному просторі визначається з врахуванням рівня інформативності окремих транс-діагоналей.

Наукова новизна.

Вперше 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. Розроблено метод структурно-зумовленого позиційного кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкового блоку. Це створює реалізацію базового етапу загальних функціональних перетворень щодо побудови компактного опису в системі стиснення з компенсацією руху об'єктів.

Наукова новизна.

Вперше 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.

Основні результати науково-прикладних досліджень другого розділу дисертації опубліковано та апробовано в наступних працях: [6; 8; 44; 45; 116].

3 МЕТОД РЕКОНСТРУКЦІЙ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ В НЕРІВНОМІРНО-ДІАГОНАЛЬНОМУ СТРУКТУРОВАНОМУ СПЕКТРАЛЬНОМУ ПРОСТОРІ ЗАЛИШКОВИХ БЛОКІВ

В розділі здійснюється побудова методології зворотних функціональних перетворень для процесу відновлення транс-діагоналей за нерівномірно-діагональним форматом структурованої трансформанти ПЗ-блоку в структурно-зумовленому позиційному просторі. Викладається розробка основних аспектів теоретичних засад для декодування кодових значень структурно-зумовлених позиційних чисел зважанням комбінаторної конфігурації трансформанти за пірамідальною текстурою. Розробляється математичне співвідношення для безпосереднього (прямого) встановлення поточного кодового значення SBP-числа в залежності від початкового коду та ваги старшого елементу. Воно базується на таких властивостях структурно-зумовлених позиційних кодових перетворень, як: обмеженості поточного кодового значення вагою попереднього старшого елементу; незалежності вагових коефіцієнтів елементів SBP-числа. Викладається створення методу незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення. Даний метод базується на використанні системи вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елементу SBP-числа з використанням співвідношення щодо наближеного оцінювання кодового значення. Будується метод узгодження між процесом відновлення ПЗ-блоків з використанням розробленого методу та етапами стандартизованої системи відновлення відеокadrів на основі вже наявної інформації щодо ПЗ-блоків.

3.1. Побудова підходу для процесу відновлення структурованих трансформант прогнозно-залишкових блоків

Система HEVC-стиснення є комплексною технологією, яка використовує механізм компенсації руху об'єктів між відеокадрами у групі. Отже це потрібно враховувати в процесі де-компресійних операційних перетворень. Відповідно такі особливості необхідно обліковувати у разі технологічних змін. До таких технологічних змін відноситься створений метод кодування прогнозно-залишкових (ПЗ) блоків в структурованому спектральному просторі. Відповідно для коректної верифікації створеного блоку кодування до HEVC-стиснення потрібно врахувати умову узгодженості інтерфейсної бази. При цьому це потрібно здійснювати згідно вимоги щодо однозначності прямих та зворотних перетворень. В цьому ракурсі процес відновлення на рівні кодування ПЗ-блоків необхідно будувати з врахуванням забезпечення потрібного рівня цілісності використовуючи лише ті службові відомості, які [7; 116]:

- генеруються в процесі створеного методу кодування;
- використовуються для забезпечення узгодженості з суміжними техно-етапами системи HEVC-стиснення.

Важливим тут є:

- 1) визначеність щодо техно-етапу загального процесу стиснення, для якого здійснюється модифікаційні операційні дії;
- 2) маркерування сукупності службових відомостей;
- 3) врахування двох базових режимів обробки системи HEVC-стиснення, а саме Intra та Inter-обробка;
- 4) забезпечення контрольованого рівня властивості взаємно-однозначності між процесами відновлення та компресії ПЗ-блоків.

В загальному випадку система F_{decod} зворотних перетворень для відновлення послідовності $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ за кодовим значенням $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ описується наступним чином:

$$F_{\text{decod}} : Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)}; \Omega_{\text{par}}; \Omega_{\text{pat}}),$$

де Ω_{par} - сукупність службових відомостей, яка використовується для організації процесу прямих кодових перетворень;

Ω_{pat} - сукупність залежностей між квант-компонентами послідовностей в нерівномірно-діагональному структурованому спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків, які зумовлені її структурно-комбінаторними та психовізуально-комбінаторними особливостями.

Для синтезу системи F_{decod} потрібно враховувати такі аспекти :

1. Особливість процесів прямих функціональних перетворень.
2. Наявність допоміжної інформації Ω_{par} , яка формується в процесі побудови кодових значень $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ структурно-зумовлених позиційних чисел (SB-чисел) $U_{\tau}^{(\ell)}$.

До особливостей загального процесу функціональних перетворень слід віднести наступні :

1) нерівномірність кодограм компактного представлення транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ трансформаційного ПЗ-блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$;

2) кодограма транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ на рівні утворення кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ впливає на зміст двох компонент, а саме:

- інформаційної $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ шляхом визначення кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ SB-числа. Така компонента є нерівномірною, $I_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \text{var}$ в бітовому еквіваленті;

- службової $J_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ шляхом генерації даних щодо: величини $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$

загального діапазону можливих значень квант-компонент транс-діагоналі. Довжина бітового еквіваленту службової компоненти є сталою величиною в межах окремої трансформанти, $I(r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}) = \text{const}$;

3) наявність властивості щодо ідентифікації кодограми транс-діагоналі в загальному кодовому синтаксисі трансформанти ПЗ-блоку без витрат на додаткові маркерні роздільники;

4) формування структурно-зумовлених позиційних чисел на базі транс-діагоналей спектрального простору ПЗ-блоків;

5) наявність особливості формування вагового базису структурно-зумовленого позиційного кодування з врахуванням поточної кількості допустимих структурованих послідовностей;

6) залежність довжини та напрямку індексації квант-компонент транс-діагоналі від її позиції в трансформанті прогнозно-залишкового блоку;

7) індексацію квант-компонент послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі трансформанти з автоматичною прив'язкою до рівномірної двовимірної системи координат «рядок – стовпець».

Для реалізації зворотних функціональних перетворень можливе використовувати службову інформацію виключно з множини Ω_{par} . Сюди відносяться наступні відомості:

величина діапазону $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ можливих значень квант-компонент транс-діагоналі трансформанти ПЗ-блоку (рівень відновлення транс-діагоналі в структурованій трансформанті ПЗ-блоку);

параметр ρ процесу квантування спектрального простору ПЗ-блоків (рівень відновлення та реструктуризації поточного синтаксису трансформанти ПЗ-блоку);

індекс ℓ режиму обробки відео блоків, а саме внутрішньо кадровий або серед-кадровий (рівень відновлення відео блоку на основі ПЗ-блоку та індексу прогнозної моделі).

Розглянемо формування функціональних перетворень для процесу відновлення транс-діагоналей у структурованому спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків.

Функціонал $F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ утворюється перетвореннями, які мають призначення щодо відновлення структурованих транс-діагональних послідовностей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ за кодovими значеннями $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Таке відновлення здійснюється в структурно-зумовленому позиційному просторі з врахуванням особливостей комбінаторної конфігурації послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі трансформованих ПЗ-блоків $Q_{\tau}^{(\ell)}$. Процес реконструкції $F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ в загальному випадку описується таким математичним записом [7; 116]:

$$Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)}; \Omega_{\text{par}}),$$

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} \in C_{\tau}^{(\ell)} \text{ та } Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} \in Q_{\tau}^{(\ell)}.$$

Тут $C_{\tau}^{(\ell)}$ - сукупність кодovих значень для ℓ -го структурованого трансформаційного ПЗ-блоку:

$$C_{\tau}^{(\ell)} = \{C_{\tau}^{(\ell, 1)}; \dots; C_{\tau}^{(\ell, \xi)}; \dots; C_{\tau}^{(\ell, 2n-1)}\}.$$

По розробленому матеріалу можна стверджувати, що:

- побудовано методологія зворотних функціональних перетворень для процесу відновлення транс-діагоналей за нерівномірно-діагональним форматом структурованої трансформанти ПЗ-блоку в структурно-зумовленому позиційному просторі.
- сформульовані основні вимоги відносно синтезу функціональних перетворень процесу відновлення прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі.

3.2. Розробка теоретичних засад для декодування структурованих транс-діагоналей на основі структурно зумовленого позиційного базису

Розглянемо розробку загальної схеми декодування.

Синтезуємо зворотне функціональне перетворення $F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ для процесу відновлення транс-діагональних послідовностей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ структурованих трансформант прогнозно-залишкових блоків [7; 9; 10].

Реалізується зворотне перетворення між множинами $\Omega(E)$ кодових значень $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ та $\Omega(Q)$ транс-діагональних послідовностей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ трансформанти в структурно-зумовленому позиційному базисі. Це описується наступним математичним співвідношенням:

$$Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)}; r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}), \quad (3.1)$$

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} \in C_{\tau}^{(\ell)} \text{ та } Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} \in Q_{\tau}^{(\ell)}.$$

За результатами чого отримується послідовність $Q_{\tau}^{(\ell)}$ (трансформованих ПЗ-блоків) SBP-чисел – транс-діагоналей [7; 9; 10]:

$$C_{\tau}^{(\ell)} = \{C_{\tau}^{(\ell, 1)}; \dots; C_{\tau}^{(\ell, \xi)}; \dots; C_{\tau}^{(\ell, n_{\xi})}\} \xrightarrow{F_{\text{decod}}} \\ \xrightarrow{F_{\text{decod}}} Q_{\tau}^{(\ell)} = \{Q_{\tau}^{(\ell, 1)}; \dots; Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}; \dots; Q_{\tau}^{(\ell, n_{\xi})}\}.$$

Для побудови функціоналу $F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ зворотного перетворення *пропонується* враховувати їх типову належність до класу адитивних базисів. Під адитивним базисом розуміються такі функціональні перетворення, які ґрунтуються на визначенні кількості допустимих комбінацій в умовах заданого значення старшого елемента.

В основі функціональних перетворень лежить визначення адитивних складових $\Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ кодових значень. Такі складові є інформативно-позиційною вагою структурно-зумовленого (SB) базисного простору. Вони визначаються кількістю допустимих послідовностей, які передують поточній транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Відповідно кодове значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ обчислюється за формулою [7; 9; 10]:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi=1}^{n_{\xi}} \Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}.$$

В цьому виразі величина $\Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ визначається за допомогою зважування елементу $u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ в структурно-зумовленому позиційному просторі. Тобто маємо:

$$\Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)} = u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} \cdot V(\alpha, \beta, \tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)},$$

де $u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ - значення χ -го елементу SBP-числа з врахуванням умови нерівності першого порядку та напрямку неоднорідності між сусідніми компонентами $q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ та $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$;

$P_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ - вага χ -го елементу в структурно-зумовленому позиційному просторі.

Отже кодове значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ знаходиться за такою згорткою:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi=1}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\chi}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.2)$$

Для відновлення елементів $u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ SBP-чисел *пропонується* застосовувати наближену схему. Вона використовує властивість кодових

значень $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ структурно-зумовленого позиційного простору. Це стосується адитивності інформативно-позиційної ваги $\Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Згідно чого величина $\Delta_{\chi} P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ визначається кількістю допустимих послідовностей $\Delta_{\chi} \tilde{Q}_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ довжиною $(n_{\xi} - \chi + 1)$, які :

- передують складовій $\Delta_{\chi} Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ поточного ξ -го SBP-числа;
- мають фіксовані значення старших $(\chi - 1)$ елементів.

Звідси кодове значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ буде обмежено зверху величиною $P_0^{(\ell, \xi)}$ [9; 10]:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} < P_0^{(\ell, \xi)}, \quad (3.3)$$

яка дорівнює перемноженню діапазонів $r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$, $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ зміни значень квант-компонент транс-діагоналі. Отже величина $P_0^{(\ell, \xi)}$ дорівнює :

$$P_0^{(\ell, \xi)} = r(\tau)_1^{(\ell, \xi)} \cdot (r(\tau)^{(\ell, \xi)})^{n_{\xi}-1}.$$

Тоді за умови

$$\mu_1 > u(\tau)_1^{(\ell, \xi)} \quad (3.4)$$

нерівність (3.3) уточнюється наступним чином [9; 10]:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} < \mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} \leq P_0^{(\ell, \xi)}. \quad (3.5)$$

Означена властивість має два слідства :

1) з одного боку. Вага $P_1^{(\ell, \xi)}$ першого елементу $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ SBP-числа буде верхньою межею для кодового значення $\Delta_2 C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ послідовності зі старшим елементом $u(\tau)_2^{(\ell, \xi)}$. Тобто [9; 10]:

$$P_1^{(\ell, \xi)} > \Delta_2 P_\tau^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi=2}^{n_\xi} u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} ; \quad (3.6)$$

2) з іншого боку. Кодове значення $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ SBP-числа буде перевищувати величину $(\mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)})$:

$$\mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} < C_\tau^{(\ell, \xi)} \quad (3.7)$$

у разі, коли для μ_1 виконується умова :

$$\mu_1 < u(\tau)_1^{(\ell, \xi)} . \quad (3.8)$$

Дійсно, в умовах нерівності (3.8) для кодового значення $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ маємо таке співвідношення [9; 10]:

$$\begin{aligned} C_\tau^{(\ell, \xi)} &= u(\tau)_1^{(\ell, \xi)} \cdot P_1^{(\ell, \xi)} + \sum_{\chi=1}^{n_\xi} u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} \geq \\ &\geq \mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} + \sum_{\chi=1}^{n_\xi} u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} \geq \mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} . \end{aligned}$$

Знак рівняння в правій частині даного виразу буде досягатись у разі, якщо $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)} = 0$.

Звідси, якщо виконується умова $\mu_1 = u(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$, то кодове значення $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ для ξ -го SBP-числа знаходиться в межах, які визначаються нерівністю [9; 10]:

$$\mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} \leq C_\tau^{(\ell, \xi)} < (\mu_1 + 1) \cdot P_1^{(\ell, \xi)} . \quad (3.9)$$

Відповідно до чого, якщо співвідношення (3.9) виконується, то значення першого елементу $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ SBP-числа дорівнює μ_1 . Тобто $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)} = \mu_1$.

Для визначення значення величини μ_1 проведемо наступні математичні перетворення. Тут потрібно зважати на те, що відомими є тільки величини $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ та $P_1^{(\ell, \xi)}$.

На першому кроці проведемо нормалізацію співвідношення (3.9). Будемо враховувати те, що наявність в лівій та правій частині даного виразу складової $P_1^{(\ell, \xi)}$ (вага першого елементу $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ SBP-числа). Тоді нормалізація полягає у вирівнюванні нижньої межі поточного кодового значення $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ до нульової відмітки. Для цього ліва та права частини співвідношення (3.9) зменшуються на величину $(\mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)})$. Тоді маємо:

$$0 \leq C_\tau^{(\ell, \xi)} - \mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} < (\mu_1 + 1) \cdot P_1^{(\ell, \xi)} - \mu_1 \cdot C_1^{(\ell, \xi)}$$

або

$$0 \leq C_\tau^{(\ell, \xi)} - \mu_1 \cdot P_1^{(\ell, \xi)} < P_1^{(\ell, \xi)}.$$

На другому кроці виключимо величину $P_1^{(\ell, \xi)}$, тобто [7; 9; 10]:

$$0 \leq \frac{C_\tau^{(\ell, \xi)}}{P_1^{(\ell, \xi)}} - \mu_1 < 1$$

або

$$0 \leq \frac{C_\tau^{(\ell, \xi)}}{P_1^{(\ell, \xi)}} - 1 < \mu_1.$$

Водночас за умовами кодування елементи SBP-числа можуть приймати лише позитивні значення. Звідси можливе тільки одно рішення, а саме:

$$\mu_1 = [C_{\tau}^{(\ell, \xi)} / P_1^{(\ell, \xi)}]. \quad (3.10)$$

Отже у разі, коли величина μ_1 знаходиться за виразом (3.10) виконується співвідношення (3.9). Відповідно значення першого елементу $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ SBP-числа дорівнює $u(\tau)_1^{(\ell, \xi)} = \mu_1$.

За аналогією визначення довільного χ -го елементу ξ -го SBP-числа здійснюється за умови виконання співвідношення:

$$\mu_{\chi} \cdot P_{\chi}^{(\ell, \xi)} \leq \Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)} < (\mu_{\chi} + 1) \cdot P_{\chi}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.11)$$

Тут $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ - поточне кодове значення складової SBP-числа, де старшим елементом є $u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$.

Співвідношення (3.11) забезпечується наступними умовами :

1) якщо величина $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ визначається за формулою [7; 9; 10]:

$$\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}, \quad (3.12)$$

тобто є кодовим значенням складової SBP-числа зі старшим елементом $u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$, то виконується властивість позиційного базису :

$$\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)} < P_{\chi}^{(\ell, \xi)}; \quad (3.13)$$

2) якщо існує така величина μ_{χ} , для значення якої виконується нерівність:

$$\mu_{\chi} < u(\alpha, \beta, \tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}, \quad (3.14)$$

а поточне кодове значення $\Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)}$ для SBP-числа обчислюється за виразом (3.12), то воно буде перевищувати величину $(\mu_\chi \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)})$:

$$\Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)} > \mu_\chi \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)}. \quad (3.15)$$

Дійсно, у разі коли величина $\Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)}$ знаходиться за формулою (3.12), то в умовах (3.14) маємо:

$$\begin{aligned} \Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)} &= u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} + \sum_{\gamma=\chi+1}^{n_\xi} u(\tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot P_\gamma^{(\ell, \xi)} \geq \\ &\geq \mu_\chi \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} + \sum_{\gamma=\chi+1}^{n_\xi} u(\tau)_\gamma^{(\ell, \xi)} \cdot P_\gamma^{(\ell, \xi)} \geq \mu_\chi \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)}. \end{aligned}$$

Знак рівняння в правій частині даного виразу буде досягатись у разі, якщо $u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} = 0$.

Після чого шляхом нормалізації співвідношення (3.11) та виключення ваги $P_\chi^{(\ell, \xi)}$ маємо:

$$0 \leq \Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)} - \mu_\chi \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} < (\mu_\chi + 1) \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)} - \mu_\chi \cdot P_\chi^{(\ell, \xi)}$$

або

$$0 \leq \frac{\Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)}}{P_\chi^{(\ell, \xi)}} - 1 < \mu_\chi.$$

Звідси значення величини μ_χ визначається виразом :

$$\mu_\chi = [\Delta_\chi C_\tau^{(\ell, \xi)} / P_\chi^{(\ell, \xi)}]. \quad (3.16)$$

Відповідно для значенням χ -го елементу ξ -го SBP-числа маємо :

$$u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} = \mu_{\chi}. \quad (3.17)$$

Вирази (3.16) та (3.17) створюють необхідні умови для відновлення значень елементів SBP-числа з використанням *наближених вирішуючих правил*, які задаються співвідношенням (3.11). При цьому використовуються властивості позиційного базису стосовно адитивності інформативно-позиційної ваги та її залежності від зважання відповідних елементів SBP-числа.

На основі викладеного матеріалу, можна заключити наступне.

Розроблені теоретичні засади для декодування кодових значень структурно-зумовлених позиційних чисел зважанням комбінаторної конфігурації трансформанти за пірамідальною текстурою. Сюди відносяться наступні аспекти:

1. Побудована система вирішального правила для визначення адитивної інформативно-позиційної ваги, яка включає значення поточного старшого елементу SBP-числа. В основі даного правила лежать:

- математичне співвідношення для наближеного оцінювання кодового значення SBP-числа відносно його адитивних складових за старшим елементом.

- властивості позиційного базису, які дозволяють наближено встановити нижню та верхню межі зміни кодового значення в структурно-зумовленому позиційному просторі.

2. Створюється вирішальне правило для вилучення поточного старшого елементу SBP-числа з відповідного інформативно-позиційного базису. В основі правила лежить синтезована функціональна залежність значення поточного старшого елементу SBP-числа від його ваги та поточного кодового значення. Синтез стосується нормалізації співвідношення для наближеного оцінювання поточного кодового значення та послідуєчого виключення ваги поточного старшого елементу SBP-числа.

Це формує необхідну умову для відновлення елементів структурно-зумовлених позиційних чисел.

Наукова новизна

Вперше 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.

3.3. Створення методу структурно-зумовленого позиційного декодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків

Необхідно зауважити на те, що у разі використання виразів (3.16) та (3.17) виникають певні обмеження. Вони стосуються того, що на момент відновлення χ -го елементу SBP-числа значення величини $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ є не визначеним. Отже потрібно встановити значення величини $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ за допомогою відомих: кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ та вагового коефіцієнту $P_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. Тут базовим підходом є варіант безпосереднього (прямого) визначення поточного кодового значення $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ [7; 9; 10].

Розглянемо варіант прямого (безпосереднього) встановлення значення величини $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Процес декодування пропонується проводити починаючи зі старших елементів SBP-числа (рис. 3.1).

Для цього представимо вираз (3.2) для знаходження кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ всього ξ -го SBP-числа через величину $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Отже з використанням формули (3.12) маємо [9; 10]:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \sum_{\gamma=1}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)} = \sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)} + \sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.18)$$

Необхідно з правої частини цього співвідношення виділити другу складову, а саме $\sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}$. Пропонується додатково використовувати такі властивості позиційного базису :

Перша властивість стосується виконання нерівності:

$$P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} > \sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.19)$$

Означену властивість можна застосовувати для розмежування складових правої частини виразу (3.18). Таке розмежування проводиться шляхом відсічі складової $\sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}$ від кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$.

Для цього виконується наступне математичне перетворення : $\left[\frac{C_{\tau}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} \right]$.

Тоді з врахуванням того, що [9; 10]:

$$\frac{\sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} < 1,$$

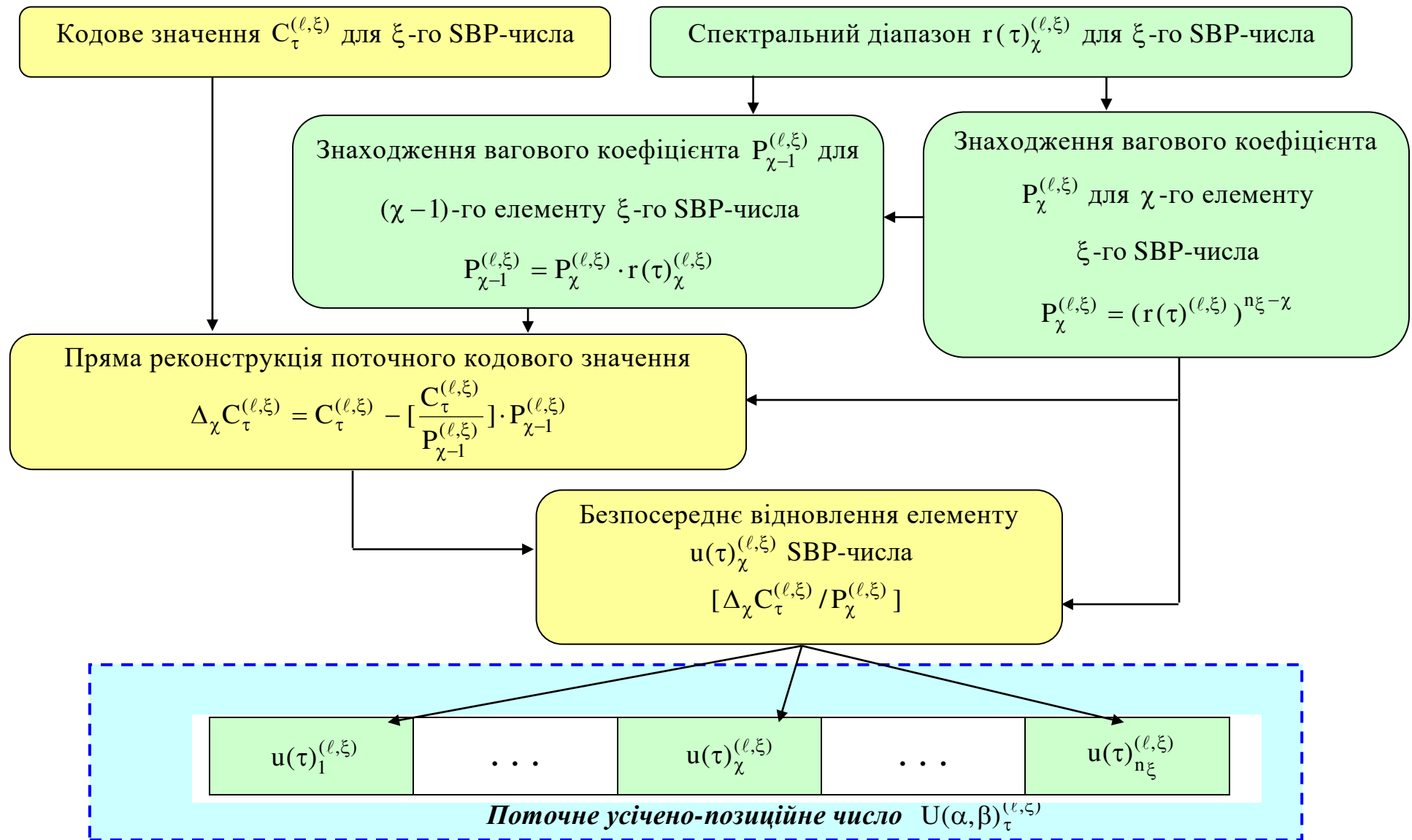


Рисунок 3.1. - Структурно-функціональна схема безпосереднього (прямого) відновлення структурно-зумовлених позиційних чисел

маємо:

$$\left[\frac{C_{\tau}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} \right] = \frac{\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} = \sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot \Delta^{\chi} P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.20)$$

Тут $\Delta^{\chi} C_{\gamma}^{(\ell, \xi)}$ - величина накопиченого перемноження діапазонів зміни значень компонент χ -ї складової транс-діагоналі, яка визначається межами $\gamma = \overline{1, \chi-1}$. Для її визначення використовується друга властивість позиційного базису. Вона стосується визначення вагових коефіцієнтів для елементів SBP-числа. Тобто:

$$P_{\gamma}^{(\ell, \xi)} = \left(\prod_{\phi=\gamma+1}^{\chi-1} r(\tau)_{\phi}^{(\ell, \xi)} \right) \cdot r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\chi}^{(\ell, \xi)} \text{ для } \gamma = \overline{1, \chi-1} \quad (3.21)$$

Звідки вага $P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ дорівнює:

$$P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} = P_{\chi}^{(\ell, \xi)} \cdot r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)},$$

а величина $\Delta^{\chi} P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}$:

$$\Delta^{\chi} P_{\gamma}^{(\ell, \xi)} = \prod_{\phi=\gamma+1}^{\chi-1} r(\tau)_{\phi}^{(\ell, \xi)}.$$

Звідси для отримання першої складової $\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}$ виразу

(3.18) необхідно умножити величину $\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot \Delta^{\chi} P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}$ (вираз (3.20)) на

вагу $P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$. Після чого маємо [9; 10]:

$$\sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot (\Delta^{\chi} P_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) = \sum_{\gamma=1}^{\chi-1} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.22)$$

Тоді величина $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ знаходиться на основі узагальнення виразів (3.20) – (3.22). А, саме [9; 10]:

$$\sum_{\gamma=\chi}^{n_{\xi}} u(\tau)_{\gamma}^{(\ell, \xi)} \cdot P_{\gamma}^{(\ell, \xi)} = C_{\tau}^{(\ell, \xi)} - \left[\frac{C_{\tau}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} \right] \cdot P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$$

або

$$\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = C_{\tau}^{(\ell, \xi)} - \left[\frac{C_{\tau}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} \right] \cdot P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}. \quad (3.23)$$

Отже шляхом заміни величини $\Delta_{\chi} C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ в формулі (3.16) виразом (3.23) формується співвідношення для відновлення значення довільного χ -го елементу ξ -го SBP-числа. Тобто маємо [9; 10]:

$$u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} = \left[(C_{\tau}^{(\ell, \xi)} - \left[\frac{C_{\tau}^{(\ell, \xi)}}{P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}} \right] \cdot P_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}) / P_{\chi}^{(\ell, \xi)} \right]. \quad (3.24)$$

В цьому випадку для отримання значення елементу $u(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ потрібно знати тільки інформацію щодо: кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ та діапазонів $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ зміни значень компонент ξ -ї транс-діагоналі, $\gamma = \overline{1, n_{\xi}}$.

Структурно-функціональна схема технологічного процесу структурно-зумовленого позиційного декодування за схемою безпосереднього відновлення елементів наводиться на рис. 3.2 (варіант алгоритмічної реалізації).

Відновлення елементів здійснюється за довільною їх позицією χ в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ в незалежності від процесу відновлення інших елементів.

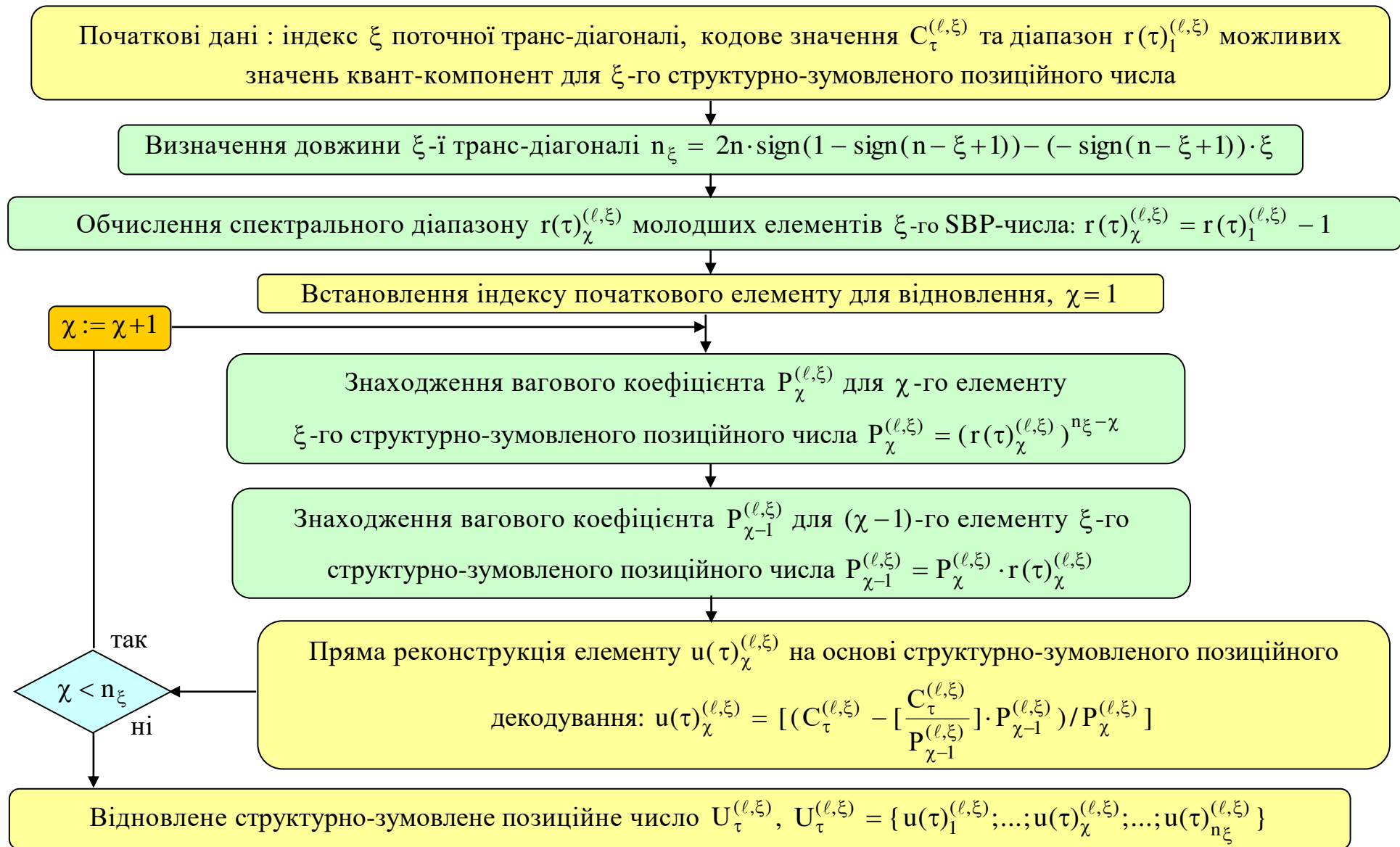


Рисунок 3.2. - Структурно-функціональна схема технологічного процесу структурно-зумовленого позиційного декодування за схемою безпосереднього відновлення елементів

Отже співвідношення (3.23) створює достатню умову щодо реалізації процесу структурно-зумовленого позиційного декодування.

Структурно-функціональна схема узагальнених структурно-зумовлених позиційних кодових перетворень наведена на рис. 3.3. Тут відображається технологічне ядро прямих та зворотних процесів в структурно-зумовленому позиційному просторі.

В результаті використання виразу (3.24) організується відновлення елементів $u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ структурно-зумовленого позиційного числа $U_\tau^{(\ell, \xi)}$:

$$U_\tau^{(\ell, \xi)} = \{ u(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; \dots; u(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}; \dots; u(\tau)_{n_\xi}^{(\ell, \xi)} \}.$$

По результатам викладеного матеріалу можна заключити наступне :

1. Створено математичне співвідношення для безпосереднього (прямого) встановлення поточного кодового значення SBP-числа в залежності від початкового коду та ваги старшого елементу. Воно базується на таких властивостях структурно-зумовлених позиційних кодових перетворень, як :

- обмеженості поточного кодового значення вагою попереднього старшого елементу;

- незалежності вагових коефіцієнтів елементів SBP-числа

Це утворює достатню умову для відновлення елементів SBP-числа

2. Розроблено метод незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення. Даний метод базується на використанні системи вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елементу SBP-числа з використанням співвідношення щодо наближеного оцінювання кодового значення.

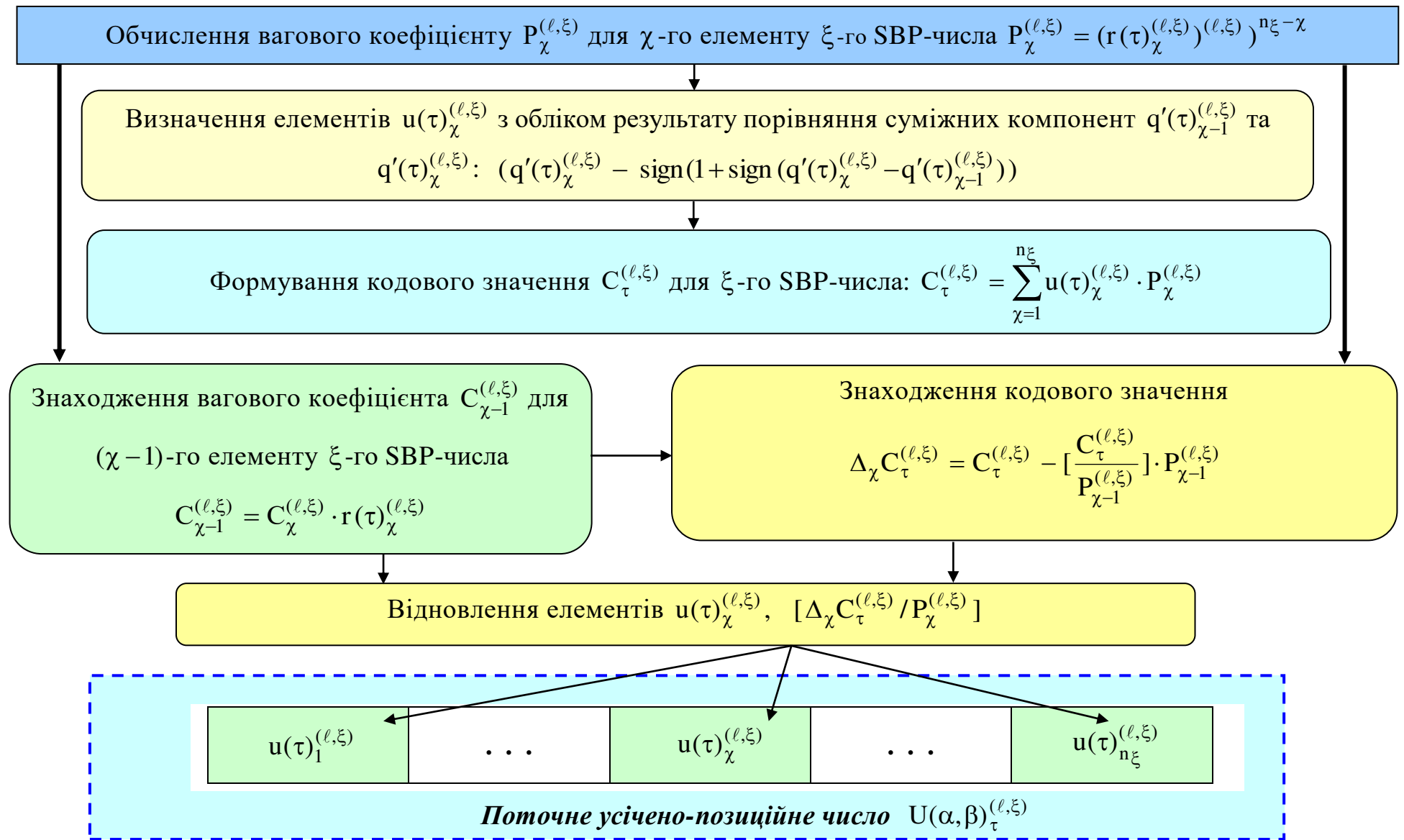


Рисунок 3.3. - Структурно-функціональна схема кодового технологічного ядра структурно-зумовлених позиційних перетворень

Наукова новизна.

Вперше 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 ПЗ-блоків в умовах збереження потрібного рівня цілісності інформації.

3.4. Побудова способу відновлення прогнозно-залишкових блоків в часовому просторі на основі де-квантування та реструктуризації спектрального простору

Відновлення прогнозно-залишкових блоків $\tilde{R}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell)}$ в часовому просторі є одним з ключових етапів загального процесу реконструкції відеоданих. Таке пояснюється трьома чинниками [7; 9; 10]:

1) по-перше, це те, що ПЗ-блокі несуть основну інформацію про відеодані, та отже значимо впливають на:

- рівень інформаційної цілісності з позиції якості сприйняття відеокадрів;

- можливість та точність вирішення задач з ідентифікації об'єктів;

2) по-друге, це те, що даний етап є одним з обчислювально-ємних в загальному процесі відновлення. Звідси слідує значимий вплив на загальну часову затримку на обробку відеоданих;

3) третій чинник зумовлений тим, що етап формування прогнозно-залишкових блоків є перехідним між:

- інтегрованим методом кодування, який розроблено з використанням інноваційного підходу;

- стандартизованою системою стиснення з використанням технології компенсації руху об'єктів.

Відновлення прогнозно-залишкових (ПЗ) блоків $\tilde{R}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell)}$ в часовому просторі здійснюється на основі де-квантування та реструктуризації його представлення $\tilde{S}_\tau^{(\ell)}$ в спектральному просторі, тобто:

$$\tilde{S}_\tau^{(\ell)} \rightarrow \tilde{R}(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell)}.$$

В свою чергу це включає наступні техно-етапи:

1. Відновлення транс-діагоналей $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$ в структурованому спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків $Q_\tau^{(\ell)}$ на основі SB-позиційного декодування за кодовим значенням $C_\tau^{(\ell, \xi)}$:

$$C_\tau^{(\ell, \xi)} \rightarrow Q_\tau^{(\ell, \xi)}; \quad Q_\tau^{(\ell, \xi)} = \{q(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; \dots; q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}; \dots; q(\tau)_{n_\xi}^{(\ell, \xi)}\},$$

де $q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ - χ -а квант-компонента ξ -ї транс-діагоналі $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$ прогнозно-залишкового блоку $Q_\tau^{(\ell)}$ в спектральному просторі (квантований транс-блок); n_ξ - довжина ξ -ї транс-діагоналі $Q_\tau^{(\ell, \xi)}$.

2. Де-форматування нерівномірно-діагонального структурованого спектрального простору. В цьому разі відновлюється початкова рядково-стовбцова система координат квант-компонент, тобто:

$$q(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \rightarrow q(i, j)_\tau^{(\ell)};$$

$$i = \varphi_i(\xi; \chi; n); \quad j = \varphi_j(\xi; \chi; n);$$

$$\varphi_i(\xi; \chi; n) = \begin{cases} \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \end{cases}$$

$$\varphi_j(\xi; \chi; n) = \begin{cases} \chi + \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \xi - \chi + 1 - \theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta + 1)), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1, \end{cases}$$

де $q(i, j)_{\tau}^{(\ell)}$ - (i, j) -а квант-компонента прогнозно-залишкового блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$ в квантованому спектральному просторі, $q(i, j)_{\tau}^{(\ell)} \in N$; $\theta = n - \xi$.

(i, j) - координата по i -му рядку та j -му стовбцю трансформанти.

3. Формування пост-квантового спектрального простору ПЗ-блоків $\tilde{S}_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ на основі технології де-квантування з реструктуризацією;

$$Q_{\tau}^{(\ell)} \xrightarrow{\varphi_{qu}^{(-1)}(\rho, i, j)} \tilde{S}_{\tau}^{(\ell, \xi)},$$

де $\varphi_{qu}^{(-1)}(\rho, i, j)$ - значення функції де-квантування для визначення (i, j) -го елементу $\lambda(i, j)$ квант-матриці Λ згідно обраної стратегії та параметру ρ візуальної якості.

4. Відновлення ПЗ-блоків $\tilde{R}(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$ в часовому просторі на основі зворотного дискретного косинусного перетворення $\varphi_{dct}^{(-1)}$, тобто:

$$\tilde{S}_{\tau}^{(\ell, \xi)} \xrightarrow{\varphi_{dct}^{(-1)}} \tilde{R}(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}.$$

Реалізація першого етапу відновлення ПЗ-блоків базується на використанні кодових перетворень за виразом (3.23):

$$Q_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{\text{decod}}(C_{\tau}^{(\ell, \xi)}; r(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}).$$

Тут $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ - діапазон зміни значень квант-компонент $q(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ для ξ -ї транс-діагоналі, $\chi = \overline{1, n_{\xi}}$.

В результаті чого, формується сукупність транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$,

$$Q_{\tau}^{(\ell)} = \{Q_{\tau}^{(\ell, 1)}; \dots; Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}; \dots; Q_{\tau}^{(\ell, 2n-1)}\},$$

які утворюють структурований спектральний простір (трансформанту) ПЗ-блоків $Q_{\tau}^{(\ell)}$.

Наявність такої інформації після де-форматування нерівномірно-діагональної системи координат дозволяє виконати процес де-квантування з реструктуризацією пост-квантового опису трансформанти $\tilde{S}_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Для цього залучаються такі перетворення:

$$\tilde{s}(i, j)_{\tau}^{(\ell)} = q(i, j)_{\tau}^{(\ell)} \cdot \lambda(i, j),$$

де $\tilde{s}(i, j)_{\tau}^{(\ell)}$ - пост-квантове значення трансформанти.

Результатам таких процесів є утворення трансформаційного пост-квантового опису ПЗ-блоків $\tilde{S}_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, $\tilde{S}_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \{ \tilde{s}(i, j)_{\tau}^{(\ell)} \}$, $i, j = \overline{1, n}$. Це дозволяє перейти до виконання зворотного дискретного косинусного перетворення. Даний етап лежить в основі отримання прогнозно-залишкових блоків $\tilde{R}(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell)}$ в часовому просторі.

Окрім того, такий етап є перехідним між розробленим технологічним процесом та стандартизованою системою стиснення (наприклад системою HEVC). Відповідно наступні технологічні етапи відновлення організуються згідно стандартизованого процесу.

На основі *викладеного матеріалу* можна заключити те, що створено метод узгодження між процесом відновлення ПЗ-блоків з використанням розробленого методу та етапами стандартизованої системи відновлення відеокадрів на основі вже наявної інформації щодо ПЗ-блоків.

Висновки за третім розділом дисертації

1. Побудовано методологію зворотних функціональних перетворень для процесу відновлення транс-діагоналей за нерівномірно-діагональним

форматом структурованої трансформанти ПЗ-блоку в структурно-зумовленому позиційному просторі.

2. Розроблено теоретичні засади для декодування кодових значень структурно-зумовлених позиційних чисел зважанням комбінаторної конфігурації трансформанти за пірамідальною текстурою. Сюди відносяться наступні аспекти:

2.1. Побудована система вирішального правила для визначення адитивної інформативно-позиційної ваги, яка включає значення поточного старшого елементу SBP-числа. В основі даного правила лежать:

- математичне співвідношення для наближеного оцінювання кодового значення SBP-числа відносно його адитивних складових за старшим елементом.

- властивості позиційного базису, які дозволяють наближено встановити нижню та верхню межі зміни кодового значення в структурно-зумовленому позиційному просторі.

2.2. Створено вирішальне правило для вилучення поточного старшого елементу SBP-числа з відповідного інформативно-позиційного базису. В основі правила лежить синтезована функціональна залежність значення поточного старшого елементу SBP-числа від його ваги та поточного кодового значення. Синтез стосується нормалізації співвідношення для наближеного оцінювання поточного кодового значення та послідуєчого виключення ваги поточного старшого елементу SBP-числа. *Це формує необхідну умову для відновлення елементів структурно-зумовлених позиційних чисел.*

Наукова новизна. Вперше 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.

3. Розроблено математичне співвідношення для безпосереднього (прямого) встановлення поточного кодового значення SBP-числа в залежності від початкового коду та ваги старшого елемента. Воно базується на таких властивостях структурно-зумовлених позиційних кодових перетворень, як:

- обмеженості поточного кодового значення вагою попереднього старшого елемента;
- незалежності вагових коефіцієнтів елементів SBP-числа

Це утворює достатню умову для відновлення елементів SBP-числа

4. Розроблено метод незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення. Даний метод базується на використанні системи вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елемента SBP-числа з використанням співвідношення щодо наближеного оцінювання кодового значення.

Наукова новизна. Вперше 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 ПЗ-блоків в умовах збереження потрібного рівня цілісності інформації.

5. Створено метод узгодження між процесом відновлення ПЗ-блоків з використанням розробленого методу та етапами стандартизованої системи відновлення відеокадрів на основі вже наявної інформації щодо ПЗ-блоків

Основні результати науково-прикладних досліджень, що викладено в третьому розділі дисертації, опубліковано та апробовано в таких наукових працях: [7; 9; 10; 116].

4. ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ СТИСНЕННЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОДАНИХ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

В розділі здійснюється формування методології щодо оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів. Проводиться розробка інформаційної моделі для оцінювання об'єму бітового опису компактного синтаксису для розробленого методу. При цьому обліковуються властивості комбінаторної конфігурації структурованої трансформанти ПЗ-блоку в нерівномірно-діагональному форматі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування. Скорочення кількості надмірності досягається на основі врахування структурно-комбінаторних та психовізуально-комбінаторних залежностей в нерівномірно-діагональному представленні структурованої трансформанти прогнозно-залишкового блоку.

З використанням програмної моделі організуються експериментальні дослідження щодо: порівняння кодування прогнозно-залишкових блоків на основі створеного методу структурно-зумовленого позиційного кодування (SBPC) та методу двійкового цілочисельного арифметичного кодування (CABAC) за [11]:

- рівнем стиснення відео блоків та відеокадрів;
- впливом на збільшення ефективності функціонування систем стиснення з компенсацією руху стосовно зменшення інтенсивності відеопотоку, передачі в реальному часі відеопотоку з більшим рівнем якості, а саме: збільшення частоти кадрів, підвищення розподільної здатності;
- скорочення витрат на побудову та розгортання інфокомунікаційних мереж.

4.1. Обґрунтування методології оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів

Розглянемо методологію оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів. Сучасними прикладами таких систем є платформи HEVC/H265 та VVC/H266 [88; 115; 135;]. Основна особливість таких систем стиснення є існування ієрархічної концепції опису модульно-кодової одиниці (компоненти). Сюди відносяться такі [42]:

1. Рівень модульно-кодового опису для відео блоків. Це зумовлено тим, що основне навантаження з виявлення патернів, аналіз для побудови векторів руху та реалізації обчислювального процесу за об'ємом даних здійснюється для відео блоків. При цьому обробка відео блоків здійснюється в двох режимах: Intra – внутрішньо кадрова обробка; Inter обробка, навпаки, пов'язана з використанням патернів між відеокадрами в послідовності (GOP-групі). Важливим тут є те, що для кожного відео блоку двох напрямків обробки (Intra та Inter) використовуються два базових режими кодування:

- кодування інформативного відео блоку (початковий блок, що містить об'єкт руху; блок, який утворюється на основі серед-кадрового передбачення, за умов обмеженості статистичних властивостей (патернів));

- кодування фоновий блоку або блоку з вмістом об'єкту руху за умов його компенсації відносно попереднього кадрів шляхом встановлення вектору руху.

2. Рівень модульно-кодового опису для відеокадрів. Це пояснюється тим, що кожний кадр класифікується за типом та напрямком виявлення патернів та впливу на рівень цілісності. Відповідно розрізняються кадри І-класу, Р-класу та В-класі. Тут найбільший вплив на рівень цілісності мають кадри І-класу. Відповідно найменший вплив призначається для кадрів В-класу. В цьому разі І-кадр є базовим, відносно якого здійснюється обробка з передбаченням інших двох класів. Звідси для базового кадру (І-клас) більш притаманне є внутрішньо кадрова обробка (режим Intra). Тоді як для кадрів

P та B-класів основні патерні виявляються на рівні серед-кадрової обробки (режим Inter);

3. Рівень модульно-кодowego опису для рівні групи кадрів (GOP). Таке обґрунтовується тим, що процес класифікації кадрів організується в межах локальних кадрових послідовностей – GOP-групи.

Такі особливості визначають методологію оцінювання ефективності систем стиснення за умов порівняння їх:

- 1) з іншими кодеками з компенсацією руху;
- 2) з кодеками стиснення лише окремих кадрів (використовується метод кодування базового кадру (кадр I-класу), наприклад режим HEVC/H265. Intra;

- 3) в режимах використання різної комплектації, в тому числі, як основний варіант порівняння ефективності системи стиснення зі стандартною комплектацією та у разі інтегрування інноваційних (альтернативних) модулів кодування.

Звідси обґрунтованим є необхідність здійснення оцінювання на таких рівнях кодування [11; 42; 94; 115]:

- 1) окремих відео блоків, особливо з високим рівнем інформативності. Це зумовлено тим, що розроблений метод, який інтегрується до систем стиснення, призначений саме для обробки окремих інформативних блоків;

- 2) кадрів різних класів в GOP-групи. Таке пояснюється тим, що ефективність кодування інформативних блоків впливає на загальну ефективність стиснення кадрів I-класу та P-класу;

- 3) групи кадрів, що зумовлено необхідністю визначення інтегрованої ефективності обробки потокової одиниці відеоданих за умов різної комплектації систем стиснення. Потрібно зауважити, що саме інтегрована ефективність є визначальною для оцінки якості надання відеоінформаційних сервісів.

Відповідно *пропонується* формувати основні показники оцінювання систем стиснення за обліком трьох рівнів кодування.

Визначальним показником ефективності є коефіцієнт μ стиснення.

Під коефіцієнтом стиснення розуміється величина, що дорівнює середній кількості біт початкового синтаксису (до стиснення), яка міститься в одному біті компактного синтаксису. При визначенні коефіцієнту стиснення потрібно враховувати рівень кодування, тобто рівень інтеграції відео-компоненти (блок, кадр, група кадрів).

Отже, якщо в якості відео-компоненти розглядається відео блок, то для визначення величини μ маємо такий вираз, $\mu \rightarrow \mu(k, l)_\tau^{(\ell)}$:

$$\mu(k, l)_\tau^{(\ell)} = \frac{I_b(k, l)_\tau}{I'(k, l)_\tau^{(\ell)} + I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)}}. \quad (4.1)$$

В цій формулі прийняті такі позначення;

1) $\mu(k, l)_\tau^{(\ell)}$ - коефіцієнт стиснення (k, l) -го блоку τ -го кадру в ℓ -м режимі обробки ($\ell = 1$ - внутрішньо кадрова обробка; $\ell = 2$ - серед кадрова обробка);

2) (k, l) - координата блоку у відеокадрі: k - індекс рядку; l - індекс стовбцю, $k = \overline{1, K/n}$, $l = \overline{1, L/n}$;

3) τ - індекс кадру в групі (якщо $\tau = 1$, то кадр є базовим (І-класу);

4) $I'(k, l)_\tau^{(\ell)}$, $I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)}$ - складові об'єму кодограми компактного синтаксису прогнозно-залишкового блоку в структурованому спектральному просторі, які відповідно залежать від кодового значення та службово-допоміжних параметрів. Вони визначають об'єм $I(k, l)_{\text{comp}, \tau}^{(\ell)}$ компактного представлення відео блоку:

$$I(k, l)_{\text{comp}, \tau}^{(\ell)} = I'(k, l)_\tau^{(\ell)} + I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)}; \quad (4.2)$$

5) $I_b(k, l)_\tau$ - об'єм в бітах початкового блоку (до стиснення):

$$I_b(k, l)_\tau = i_{\text{px}} \cdot n^2,$$

де i_{px} - кількість біт на один елемент (піксель) блоку. За части
 $i_{px} = 8; 16; 24$ біта.

У разі, коли відео-компонентою є окремий кадр, то матимемо таку формулу для визначення коефіцієнта $\mu_{\tau}^{(\ell)}$ стиснення:

$$\mu_{\tau}^{(\ell)} = \frac{i_{px} \cdot n^2 \cdot K \cdot L}{\sum_{k=1}^{K/n} \sum_{l=1}^{L/n} (I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)} + I(k,l)_{ser,\tau}^{(\ell)})}, \quad (4.3)$$

де $\mu_{\tau}^{(\ell)}$ - коефіцієнт стиснення τ -го кадру в ℓ -м режимі обробки;

$$I(K;L)_{\tau} = \sum_{k=1}^{K/n} \sum_{l=1}^{L/n} I(k,l)_{comp,\tau}^{(\ell)} - \text{об'єм в бітах стиснутого } \tau\text{-го}$$

відеокадру; K, L - кількість відповідно рядків та стовбців у відеокадрі;

$$n_{bl} = \frac{K}{n} \cdot \frac{L}{n} - \text{кількість блоків у відеокадрі розміром } K \times L.$$

Для варіанту розгляду відео-компоненти, як послідовність кадрів матимемо таку формулу для визначення рівня $\mu(n_{frc})$ стиснення :

$$\mu(n_{frc}) = \frac{n_{frc} \cdot i_{px} \cdot n^2 \cdot K \cdot L}{\sum_{\tau=1}^{n_{frc}} \sum_{k=1}^{K/n} \sum_{l=1}^{L/n} (I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)} + I(k,l)_{ser,\tau}^{(\ell)})}. \quad (4.4)$$

Тут:

n_{frc} - кількість кадрів в послідовності, яка може бути як: група кадрів; кількість кадрів, яку потрібно передати за 1 секунду;

μ_{GOP} - рівень стиснення для групи кадрів ($n_{frc} = 8$, $\mu(n_{frc}) = \mu_{GOP}$).

Окремий інтерес представляє величина $\sum_{\tau=1}^{n_{frc}} \sum_{k=1}^{K/n} \sum_{l=1}^{L/n} I(k,l)_{comp,\tau}^{(\ell)}$, що

визначається, як інтенсивність $I(n_{frc})$ стиснутого (кодованого) потоку відеоданих:

$$I(n_{\text{frc}}) = \sum_{\tau=1}^{n_{\text{frc}}} \sum_{k=1}^{K/n} \sum_{l=1}^{L/n} I(k,l)_{\text{comp},\tau}^{(\ell)}. \quad (4.5)$$

або

$$I(n_{\text{frc}}) = \sum_{\tau=1}^{n_{\text{frc}}} \sum_{k=1}^{K/n} \sum_{l=1}^{L/n} (I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)} + I(k,l)_{\text{ser},\tau}^{(\ell)})$$

Аналізуючи вирази (4.1), (4.3) та (4.5) бачимо, що важливою їх складовою є величина $I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)}$. Тому потрібно побудувати процес визначення об'єму $I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)}$ бітового опису компактного синтаксису відео блоку на основі застосування розробленого методу структурно-зумовленого позиційного кодування (SBPC) прогнозно-залишкових блоків у структурованому спектральному просторі.

Величина $I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)}$ визначає бітовий об'єм компактного представлення (k,l) -го блоку τ -го кадру в ℓ -м режимі обробки з використанням методу стиснення. Для розробленого SBPC методу кодування блоку бітовий об'єм $I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)}$ визначається сумою витрат кількості $I'(k,l)_{\tau}^{(\ell,\xi)}$ біт на компактний опис ξ -ї транс діагоналі структурованої трансформанти ПЗ-блоку, тобто:

$$I'(k,l)_{\tau}^{(\ell)} = \sum_{\xi=1}^{n_{\xi}} I'(k,l)_{\tau}^{(\ell,\xi)}. \quad (4.6)$$

Тут n_{ξ} - кількість елементів в ξ -й діагоналі:

$$n_{\xi} = 2n \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(n - \xi + 1)) - (-\text{sign}(n - \xi + 1)) \cdot \xi.$$

Відповідно об'єм $I'(k,l)_{\tau}^{(\ell,\xi)}$ компактного опису ξ -ї транс діагоналі зумовлюється величиною $I(k,l)_{\tau}^{(\ell,\xi)}$, яка знаходиться за допомогою системи виразів [11; 42; 94; 115]:

$$I_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1},$$
(4.7)

де n_{ξ} - кількість елементів в ξ -й діагоналі;

n - розмір блоку;

$P_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ - кількість перестановок, що є допустимими в умовах розгляду відповідно окремої транс-діагоналі $Q_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ прогнозно-залишкового блоку $Q_{\tau}^{(\ell)}$ у спектральному просторі

$$P_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \begin{cases} \prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)), \chi+\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)} \} + \right. \\ \left. + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right), \quad \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1)), \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(\theta+1))}^{(\ell, \xi)} \} + \right. \\ \left. + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right), \quad \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1};$$
(4.8)

Аналізуючи вираз (4.7) бачимо, що в загальному випадку величина $I(k, l)_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ є раціональним числом. Для формування кодограми використовується ціле число. Тому потрібно здійснити відповідні корективи стосовно величини $I(k, l)_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Для цього використовується величина $I'(k, l)_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, яка дорівнює:

$$I'(k, l)_\tau^{(\ell, \xi)} = [\log_2 P_\tau^{(\ell, \xi)}] + \text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2)). \quad (4.9)$$

Тут величина $\text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2))$ приймає одно з двох значень, а саме:

$$\text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2)) = \begin{cases} 0, & \rightarrow V_x(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell)} \bmod(2) = 0; \\ 1, & \rightarrow V_x(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell)} \bmod(2) \geq 1. \end{cases}$$

Отже значення $\text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2))$ визначається кратністю величини $P_\tau^{(\ell, \xi)}$ степені 2.

Отже на основі обліку та узагальнення виразів (4.6), (4.7) та (4.9) створюється умова для знаходження бітового об'єму $I'(k, l)_\tau^{(\ell)}$ інформаційної компоненти загального компактного представлення (k, l) -го блоку τ -го кадру в ℓ -м режимі обробки з використанням розробленого SBPC методу стиснення [11; 42; 94; 115]:

$$\begin{aligned} I'(k, l)_\tau^{(\ell)} &= \sum_{\xi=1}^{n_\xi} I'(k, l)_\tau^{(\ell, \xi)} = \sum_{\xi=1}^{n_\xi} \left([\log_2 P_\tau^{(\ell, \xi)}] + \text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2)) \right) = \\ &= \begin{cases} \sum_{\xi=1}^{n_\xi} \left([\log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_\xi} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right)] + \right. \\ \quad \left. + \text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2)) \right), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \sum_{\xi=1}^{n_\xi} \left([\log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_\xi} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_\xi} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_\xi}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right)] + \right. \\ \quad \left. + \text{sign}(P_\tau^{(\ell, \xi)} \bmod(2)) \right), & \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Частина $I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)}$ бітового об'єму $I(k, l)_{\text{comp}, \tau}^{(\ell)}$ компактного синтаксису відео блоку визначається наступними службовими компонентами для створеного SBPC методу:

1) кількістю $I_{r(k,l)}^{(\ell)}_{\tau}$ біт на двійковий опис інформації щодо діапазонів $r(\tau)_1^{(\ell,\xi)}$ можливих значень квант-компонент транс-діагоналей $Q_{\tau}^{(\ell,\xi)}$ структурованої трансформанти ПЗ-блоку. Тут потрібно враховувати те, що величини $r(\tau)_{\chi}^{(\ell,\xi)}$ знаходяться згідно виразу (2.18), використовуючи лише інформацію про діапазон $r(\tau)_1^{(\ell,\xi)}$:

$$r(\tau)_{\chi}^{(\ell,\xi)} = r(\tau)_1^{(\ell,\xi)} - \text{sign}(1 - \chi) = \max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{q'(\tau)_{\chi}^{(\ell,\xi)}\} + 1 - \text{sign}(1 - \chi).$$

Тому для забезпечення процесу відновлення достатньо зберігати лише одне значення $r(\tau)_1^{(\ell,\xi)}$. Для кодового представлення величини $r(\tau)_1^{(\ell,\xi)}$ ξ -ї транс діагоналі потрібно витратити кількість біт, яка дорівнює $I_{r(k,l)}^{(\ell,\xi)}_{\tau}$. Тоді величина $I_{r(k,l)}^{(\ell)}_{\tau}$ в межах всієї структурованої трансформанти ПЗ-блоку за умов $\xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}$, знаходиться наступним чином:

$$I_{r(k,l)}^{(\ell)}_{\tau} = \sum_{\xi=1}^{2 \cdot n - 1} I_{r(k,l)}^{(\ell,\xi)}_{\tau};$$

2) кількістю $I_{\rho(k,l)}^{(\ell)}_{\tau}$ біт на код параметру ρ процесу квантування спектрального простору ПЗ-блоків (рівень відновлення та реструктуризації поточного синтаксису трансформанти ПЗ-блоку);

3) кількістю $I_{\ell(k,l)}^{(\ell)}_{\tau}$ біт на код індексу ℓ режиму обробки відео блоків, а саме внутрішньо кадровий або серед-кадровий (рівень відновлення відео блоку на основі ПЗ-блоку та індексу прогнозованої моделі).

Звідси об'єм службової компоненти $I(k,l)_{\text{ser},\tau}^{(\ell)}$ визначатиметься за формулою:

$$I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)} = \sum_{\xi=1}^{2 \cdot n-1} I_r(k, l)_{\tau}^{(\ell, \xi)} + I_{\rho}(k, l)_{\tau}^{(\ell)} + I_{\ell}(k, l)_{\tau}^{(\ell)}. \quad (4.11)$$

Тоді на основі узагальнення виразу (4.10) щодо визначення об'єму $I'(k, l)_{\tau}^{(\ell)}$ інформаційної компоненти та виразу (4.11) щодо знаходження об'єму $I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)}$ службової компоненти можна побудувати співвідношення для оцінювання загального об'єму $I(k, l)_{\text{comp}, \tau}^{(\ell)}$ бітового опису компактного синтаксису відео блоку, тобто [11]:

$$I(k, l)_{\text{comp}, \tau}^{(\ell)} = I'(k, l)_{\tau}^{(\ell)} + I(k, l)_{\text{ser}, \tau}^{(\ell)} =$$

$$= \begin{cases} \sum_{\xi=1}^{n_{\xi}} \left(\left[\log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right] + \right. \\ \left. + \text{sign}(P_{\tau}^{(\ell, \xi)} \bmod(2)) \right) + \sum_{\xi=1}^{2 \cdot n-1} I_r(k, l)_{\tau}^{(\ell, \xi)} + I_{\rho}(k, l)_{\tau}^{(\ell)} + I_{\ell}(k, l)_{\tau}^{(\ell)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \sum_{\xi=1}^{n_{\xi}} \left(\left[\log_2 \left(\prod_{\chi=1}^{n_{\xi}} \left(\max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1-\chi) \right) \right] + \right. \\ \left. + \text{sign}(P_{\tau}^{(\ell, \xi)} \bmod(2)) \right) + \sum_{\xi=1}^{2 \cdot n-1} I_r(k, l)_{\tau}^{(\ell, \xi)} + I_{\rho}(k, l)_{\tau}^{(\ell)} + I_{\ell}(k, l)_{\tau}^{(\ell)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0. \end{cases} \quad (4.12)$$

Створене співвідношення дозволяє визначити бітовий об'єм компактного синтаксису відео блоку з використанням розробленого SBPC методу з врахуванням:

- витрат кількості біт на інформаційну та службові компоненти;
- нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків;
- стиснення транс-діагоналей на основі структурно-зумовленого позиційного кодування.

Для створеного методу забезпечується врахування особливостей комбінаторної конфігурації трансформанти за її нерівномірно-діагональним форматом. При цьому досягається скорочення надмірності на основі врахування структурно-комбінаторних та психовізуально-комбінаторних залежностей в діагональному представленні структурованої трансформанти ПЗ-блоку. Такі залежності в напрямку діагоналей трансформанти проявляються в наявності наступних характерних особливостей:

1) наявності стійкого структурного патерну щодо неоднорідності першого порядку, тобто виконання умови нерівності суміжних квант-компонент $q'(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ та $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ транс-діагонали, тобто:

$$\begin{cases} q'(\tau)_{\xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, (\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \neq q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)}, \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ q'(\tau)_{(\chi-1)+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi-\chi+2-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \neq q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0; \end{cases}$$

$$\text{pos}_{\xi} = \text{sign}(1 + \text{sign}((n - \xi) - 1)); \quad \theta = n - \xi; \quad \xi = \overline{1, 2 \cdot n - 1}; \quad \chi = \overline{1, n_{\xi}};$$

2) виключення впливу діапазонів низькочастотних компонент на збільшення розмаху можливих значень квант-компонент у високо частотній області трансформанти. Звідси більш характерно окреслюються обмеження на значення $r(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ діапазонів квант-компонент $q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$:

$$q'(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)} \leq \begin{cases} \max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 1; \\ \max_{1 \leq \chi \leq n_{\xi}} \{ q'(\tau)_{\chi+\theta \cdot \text{pos}_{\xi}, \xi-\chi+1-\theta \cdot \text{pos}_{\xi}}^{(\ell, \xi)} \} + 1 - \text{sign}(1 - \chi), \\ \rightarrow \xi - [\xi/2] \cdot 2 = 0. \end{cases}$$

Співвідношення (4.12) дозволяє оцінити значення коефіцієнту стиснення $\mu(k,l)_\tau^{(\ell)}$:

$$\mu(k,l)_\tau^{(\ell)} = \frac{I_b(k,l)_\tau}{\sum_{\xi=1}^{2 \cdot n-1} I_r(k,l)_\tau^{(\ell,\xi)} + \sum_{\xi=1}^{2 \cdot n-1} I_r(k,l)_\tau^{(\ell,\xi)} + I_\rho(k,l)_\tau^{(\ell)} + I_\ell(k,l)_\tau^{(\ell)}}. \quad (4.13)$$

На основі даного виразу створюється можливість для визначення інформативної ваги бітів компактного синтаксису відео блоку. Тобто середню кількість біт початкового опису відео блоку (до стиснення), що в середньому міститься в одному його біті компактного представлення.

За викладеним матеріалом досліджень можна стверджувати наступне :

1) сформульовано методологію щодо оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів;

2) розроблена інформаційна модель для оцінювання об'єму бітового опису компактного синтаксису для розробленого методу. При цьому обліковуються властивості комбінаторної конфігурації структурованої трансформанти ПЗ-блоку в нерівномірно-діагональному форматі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування. Скорочення кількості надмірності досягається на основі врахування структурно-комбінаторних та психовізуально-комбінаторних залежностей в нерівномірно-діагональному представленні структурованої трансформанти прогнозно-залишкового блоку. Такі залежності в напрямку транс-діагоналей проявляються в наявності наступних характерних особливостей:

- наявності стійкого структурного патерну щодо неоднорідності першого порядку, тобто виконання умови нерівності суміжних квант-компонент транс-діагоналі;

- виключення впливу діапазонів низькочастотних компонент на збільшення розмаху можливих значень квант-компонент у високо

частотній області трансформанти. Звідси більш характерно окреслюються обмеження на значення діапазонів квант-компонент.

4.2. Порівняльне оцінювання ефективності стиснення типових кадрів відео-групи з використанням методології модульно-кодового опису відео блоку

Найбільші втрати рівня стиснення виникають у разі кодування блоків даних з обмеженим рівнем наявних статистичних патернів. Такі блоки даних характеризуються значним рівнем інформативності. Відповідно, якщо кількість таких блоків у відеокадрі або у відеопотоці починає перевищувати поріг 30 %, то вплив на втрату рівня загальної ефективності значно зростає [11; 34]. Отже важливим є оцінити ефективність та потенціал для її зросту у разі інтегрування розробленого методу SBPC до систем стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів. Варіантами такої верифікації є системи стиснення HEVC/H265 та VVC/H266 [88; 115; 135]. Особливістю технологічної комплектації таких систем є використання технології двійкового цілочисельного арифметичного кодування (CABAC) для компактного представлення прогнозно-залишкових блоків в двійковому спектральному просторі. Для трансформації ПЗ-блоків до спектрального простору застосовується дискретне косинусне перетворення [64; 80; 103; 104; 110; 134;].

Тому потрібно здійснити порівняння SBPC методу кодування та технології CABAC. Порівняння пропонується організовувати за показником рівня $\mu(k,l)_\tau^{(\ell)}$ стиснення відео блоків. Відповідні оцінки необхідно проводити в залежності від складності семантичного контенту відео блоків та параметру квантування, що впливає на рівень цілісності відновлених відеоданих.

Рівень складності контенту (рівень інформативності) відео блоку визначається потенціалом щодо можливості виявлення характерних патернів. Це може бути патерни статистичного, психовізуального та структурного походження. Для оцінки рівня інформативності відео блоків існує декілька практично апробованих методів та технологій. Одними з ефективних є методи класифікації блоків, що представлено в працях [27; 28; 87; 81; 119]:

В якості показника $\text{loss}(k, l)_\tau^{(\ell)}$ оцінювання втрат цілісності (loss of integrity) найчастіше використовуються наступні:

- MSE – середньоквадратичне по-елементне відхилення між початковим та відновленим відео блоками;
- PSNR – показник пікового відношення сигнал/шум, який залежить від MSE;
- SSIM – коефіцієнт структурної подібності між початковим та відновленим відео блоками.

Найбільш часто застосовується показники PSNR та SSIM. Це зумовлено проведенням значною кількістю досліджень. На основі чого, було сформовано рекомендації щодо граничних значень PSNR для допустимого рівня цілісності відео блоків в залежності від рівня їх інформативності.

Отже пропонується зробити дискретизацію рівня цілісності $\text{loss}(k, l)_\tau^{(\ell)}$ за показниками PSNR та SSIM в залежності від вимог щодо характеру спотворень в різних за складністю семантичного контенту відео блоків. Відповідна дискретизація представлена в табл. 4.1. В цій таблиці визначено три градації вимог до рівня цілісності відео блоків в залежності від складності їх семантичного змісту.

Відповідно на рис. 4.1 – 4.3 наведено діаграми оцінювання коефіцієнта стиснення для розробленого SBPC методу та стандартизованого методу CABAC для відео блоків з різним рівнем

інформативності за умов виконання вимог щодо допустимих граничних значень за PSNR та SSIM.

Таблиця 4.1. – Дискретизація рівня цілісності $\text{loss}(k, l)_\tau^{(\ell)}$ за показниками PSNR та SSIM з врахуванням типів складності контенту відео блоків

Рівень $\text{loss}(k, l)_\tau^{(\ell)}$ градації цілісності	Рівень η складності контенту відео блоку	Кількісні показники визначення рівня цілісності	
		PSNR, дБ	SSIM
I	високий	42 - 45	0,98 – 0,99
II	середній	32 – 37	0,91 – 0,95
III	низький	23 – 28	0,62 – 0,77

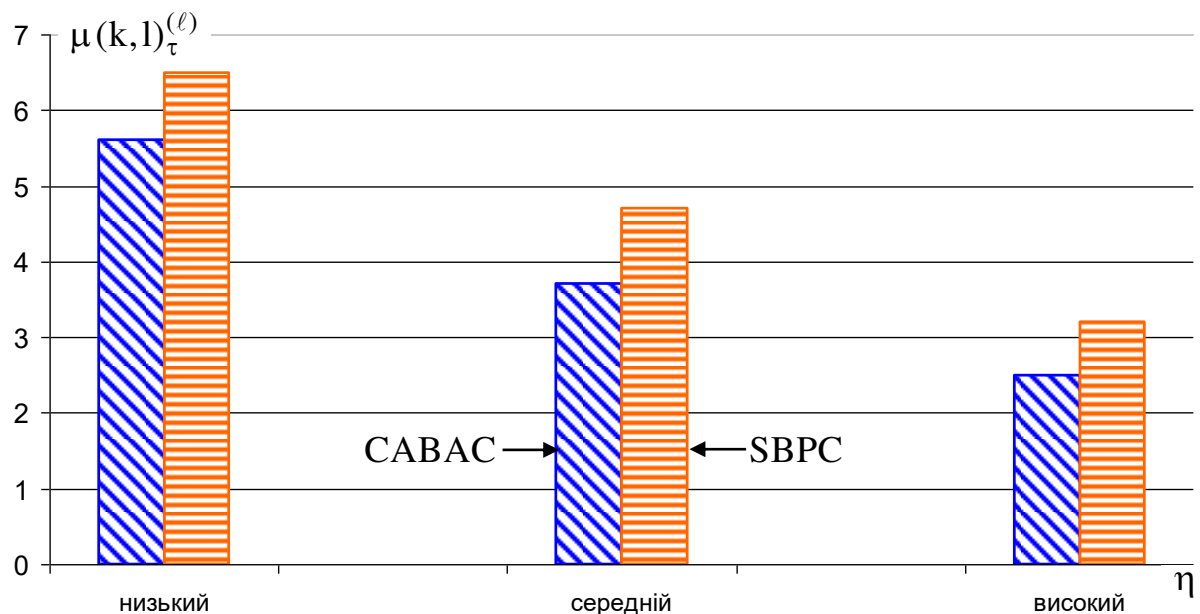


Рисунок 4.1. – Порівняльна оцінка коефіцієнту $\mu(k, l)_\tau^{(\ell)}$ стиснення в залежності від рівня η складності відео блоків для $\text{loss}(k, l)_\tau^{(\ell)} = I$

Аналізуючи діаграми на рис. 4.1 – 4.3 можна заключити наступне:

1) для створеного SBPC методу найбільша перевага досягається у разі кодування відео блоків з забезпечення першої градації рівня цілісності (PSNR: 42 – 45 дБ; SSIM: 0,98 – 0,99). Це відповідає вимогам щодо збереження потрібного рівня цілісності для високоінформативних

відео блоків. В цьому разі рівень стиснення для розробленого методу змінюється від 3,2 до 6,5 разів. При цьому перевага відносно стандартизованого методу CABAC сягає від 20 до 27 % в залежності від складності контенту відео блоку (рис. 4.1):

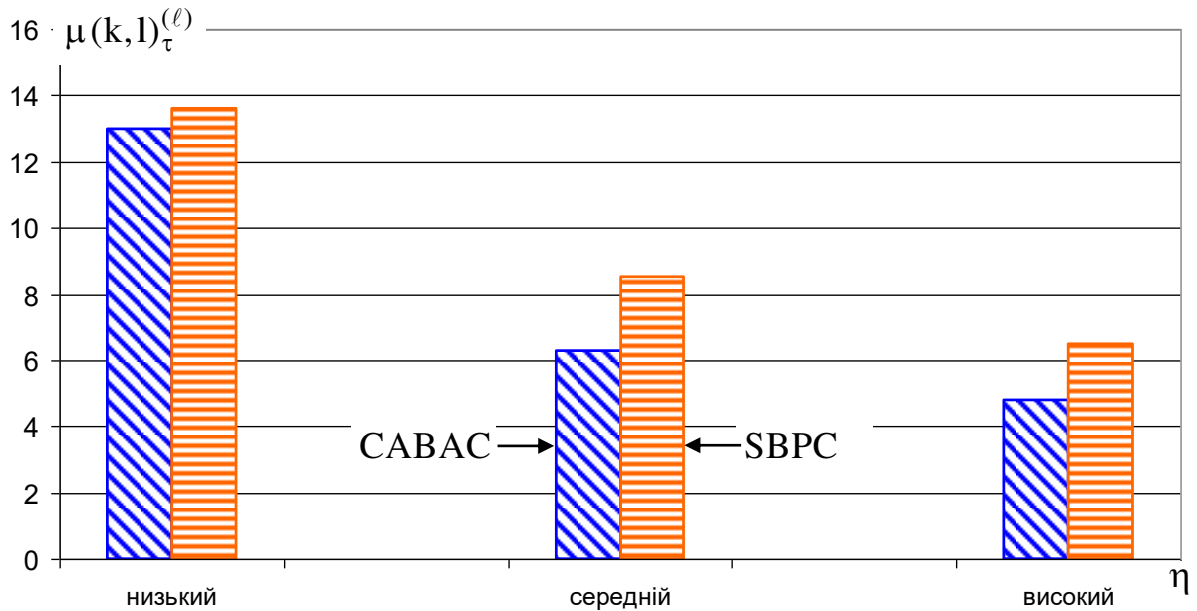


Рисунок 4.2. – Порівняльна оцінка коефіцієнту $\mu(k, l)_{\tau}^{(\ell)}$ стиснення в залежності від рівня η складності відео блоків для $\text{loss}(k, l)_{\tau}^{(\ell)} = \text{II}$

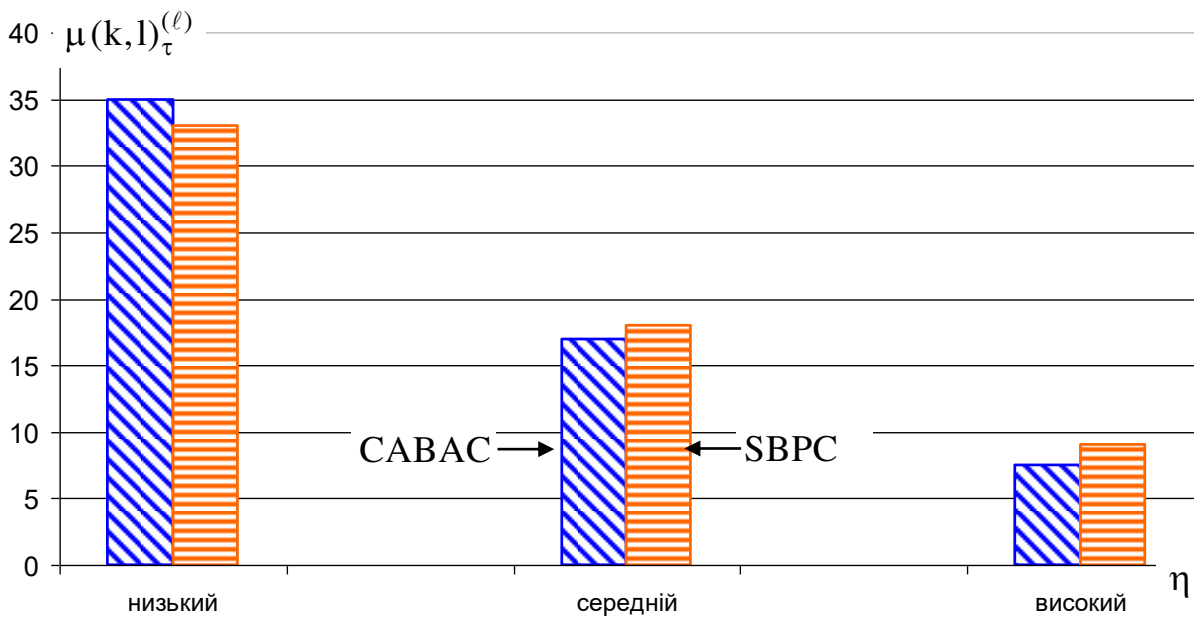


Рисунок 4.3. – Порівняльна оцінка коефіцієнту $\mu(k, l)_{\tau}^{(\ell)}$ стиснення в залежності від рівня η складності відео блоків для $\text{loss}(k, l)_{\tau}^{(\ell)} = \text{III}$

2) у разі кодування відео блоків в режимі забезпечення другої градації рівня цілісності (PSNR: 32 – 37 дБ; SSIM: 0,91 – 0,95) найбільша перевага для розробленого методу досягається у разі кодування інформативних відео блоків, а саме від 25 до 30 % в залежності від складності контенту (рис. 4.2). Відповідно рівень стиснення забезпечується на рівні від 6,5 до 8,5. При цьому коефіцієнти стиснення низько інформативних відео блоків знаходиться для порівнювальних методів на одному рівні (CABAC: 13; SBPC: 13,6);

3) найменша перевага для розробленого методу за рівнем стиснення (в середньому 10 %) досягається у III-му режимі забезпечення цілісності (PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77). При цьому метод CABAC показує більшу ефективність стиснення у разі кодування відео блоків з низьким рівнем складності контенту (рис. 4.3). Це обґрунтовує ефективність використання методу CABAC для обробки низько інформативних відео блоків.

Отже можна стверджувати те, що розроблений метод має перевагу за рівнем стиснення відносно стандартизованого методу CABAC, а саме:

- від 20 до 27 % в залежності від складності контенту відео блоку для рівня цілісності відеоінформації з PSNR: 42 – 45 дБ; SSIM: 0,98 – 0,99;

- від 25 до 30 % для інформативних відео блоків в режимі забезпечення цілісності на рівні PSNR: 32 – 37 дБ; SSIM: 0,91 – 0,95.

Складність процесів кодування за кількістю типових обчислювальних операції знаходиться на одному рівні. Це зумовлено тим, що метод CABAC реалізує арифметичне кодування в двійковому просторі. Звідси: по-перше виникає потреба у представленні трансформанти прогнозно-залишкового блоку в двійковому просторі; по-друге збільшується кількість даних, які потрібно аналізувати та обробляти з використанням технології цілочисельного двійкового арифметичного кодування.

На основі викладеного матеріалу досліджень можна заключити наступне:

1. Для створеного методу забезпечуються наступні значення рівня стиснення в залежності від складності контенту відео блоку:

- від 3,2 до 6,5 разів при забезпеченні рівня цілісності за PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99;

- від 6,5 до 8,5 разів у разі забезпечення рівня цілісності за PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

- від 9 до 33 разів, якщо рівня цілісності дорівнює за PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77.

2. Розроблений метод має перевагу за рівнем стиснення відносно стандартизованого методу CABAC, а саме:

- від 20 до 27 % в залежності від складності контенту відео блоку для рівня цілісності відеоінформації з PSNR: 42 – 45 дБ; SSIM: 0,98 – 0,99;

- від 25 до 30 % для інформативних відео блоків в режимі забезпечення цілісності на рівні PSNR: 32 – 37 дБ; SSIM: 0,91 – 0,95.

4.3. Оцінювання впливу методів кодування прогнозно-залишкових блоків систем стиснення з компенсацією руху на ефективність функціонування інфокомунікаційних мереж

Наявність оцінок щодо рівня стиснення відео блоків дозволяє здійснити порівняльне оцінювання ефективності методів CABAC та SBPS у разі обробки відеокадрів. В цьому разі інтегровано враховуються відео блоки з різним рівнем інформативності. Стиснення відеокадрів організується лише з використанням означених кодеків в режимі обробки прогнозно-залишкових блоків (обмежений профіль систем HEVC/H265 та

VVC/H266). При цьому використовуються режими обробки базового (I-класу) та передбаченого (P-класу) відеокадрів.

Відповідні оцінки представлено на рис. 4.4 та 4.5. Тут показані діаграми залежності коефіцієнту $\mu_{\tau}^{(\ell)}$ стиснення для інформативних відеокадрів I (рис. 4.4) та P (рис. 4.5) класів в залежності від рівня $\text{loss}_{\tau}^{(\ell)}$ забезпечення цілісності їх відео блоків. Оцінки проводились на основі обробки інформативних відеокадрів з середнім рівнем насиченості дрібними деталями. Для обробки обирались відеозображення з бази TID 2013 [119] та сайту [144].

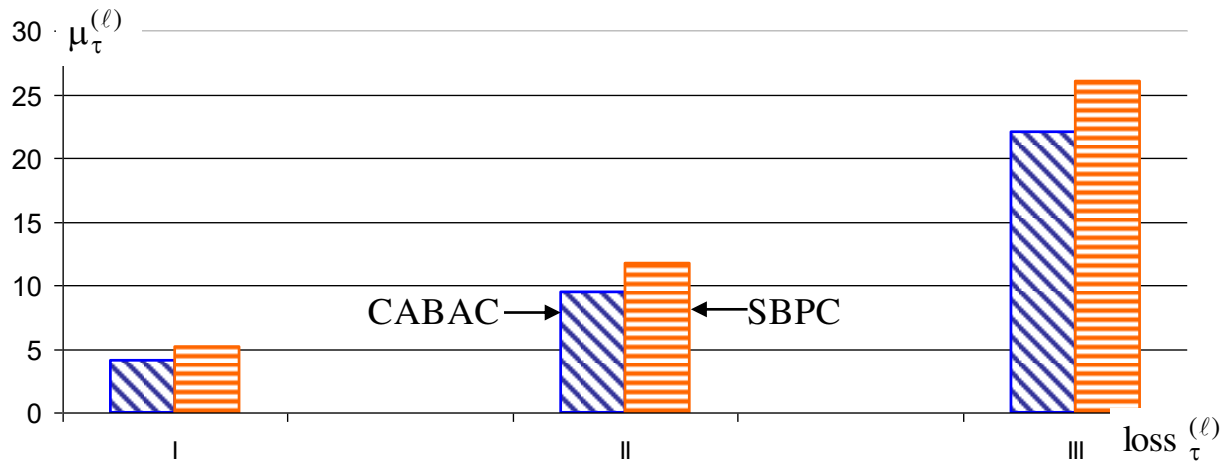


Рисунок 4.4. – Порівняльна оцінка коефіцієнту $\mu_{\tau}^{(\ell)}$ стиснення в залежності від рівня $\text{loss}_{\tau}^{(\ell)}$ забезпечення цілісності їх відео блоків в режимі кодування базових кадрів (I-клас)

Корегування рівня стиснення та цілісності забезпечується на основі зміни параметру ρ квантування. При цьому етапи перед-обробки для методів CABAC та SBPC стосовно формування прогнозно-залишкових блоків в спектральному просторі будуть однаковими. Відмінності починаються з процесів квантування. Для розробленого методу використовується квантування з формуванням діагональних неоднорідностей першого порядку.

Аналізуючи діаграми на рис. 4.4 та 4.5 можна заключити наступне. Для розробленого SBPC методу досягається перевага за коефіцієнтом стиснення відносно стандартизованого кодеку САВАС, а саме:

1) у разі кодування базових кадрів вона становить від 20 до 25 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків. При цьому відповідно коефіцієнт стиснення для розробленого методу в середньому сягає рівня від 5,2 до 27 разів (рис. 4.4);

2) у разі кодування передбачених кадрів вона становить від 15 до 20 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків. При цьому відповідно коефіцієнт стиснення для розробленого методу в середньому сягає рівня від 7,8 до 39 разів (рис. 4.5).

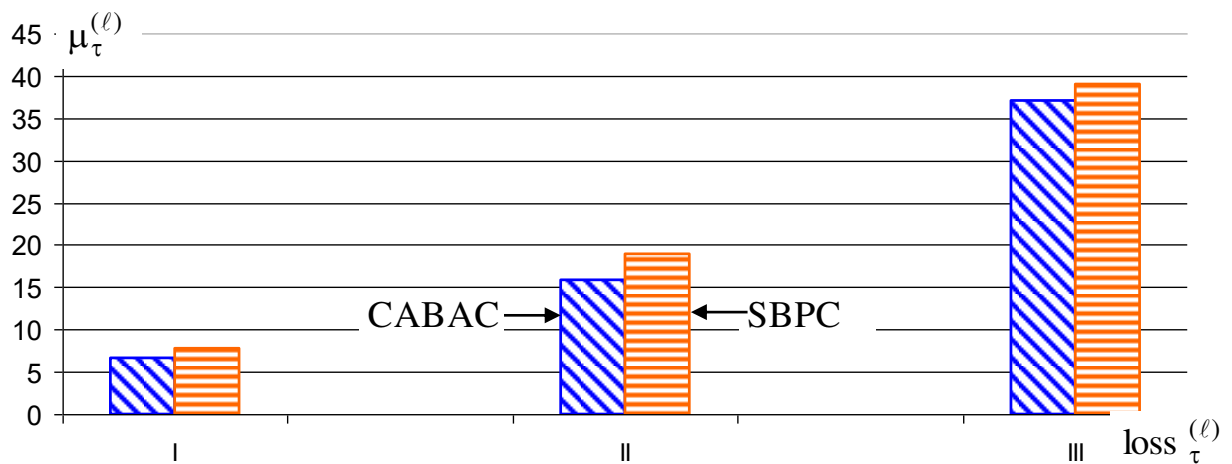


Рисунок 4.5. – Порівняльна оцінка коефіцієнту $\mu_{\tau}^{(\ell)}$ стиснення в залежності від рівня $\text{loss}_{\tau}^{(\ell)}$ забезпечення цілісності їх відео блоків в режимі кодування передбачених кадрів (Р-клас)

Приклади відновлених відеокадрів I-класу та Р-класу для різних рівнів забезпечення цілісності відеоінформації представлено на рис. 4.6 – 4.8. На рис. 4.6 представлено початковий відеокадр з ресурсу [144]. Це кадр з відеопотоку «відеозображення Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)». На рис. 4.7. наводяться відновлені відеозображення на основі методів САВАС (а) та SBPC (б) за другим рівнем градації забезпечення

цілісності у разі, коли $PSNR=37$ дБ та $SSIM=0,95$. Це є достатнім для забезпечення потрібної цілісності відновлення дрібних об'єктів та об'єктів інтересу. На рис. 4.8 представлені відновлені передбачені відеокадри. Відновлення здійснювалось також за другим рівнем градації забезпечення цілісності. Але ж обираються нижні граничні значення показників, тобто: $PSNR=32$ дБ та $SSIM=0,95$. З аналізу відеокадрів на рис. 4.6 - 4.8 можна заключити наступне:

1) на основі візуальної оцінки відновлених відеокадрів І та Р класу слідує те, що значні візуальні артефакти відсутні. Втрат дрібних об'єктів не виявлено. Присутні незначні розмиття структурних країв дрібних об'єктів у разі відновлення в режимі передбачених відеокадрів;



Рисунок 4.6. – Початковий відеокادر «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)»

2) процес формування умови щодо неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків не впливає на додаткову втрату цілісності інформації. Тобто корекції квант-компонент є не значимими та впливають на зменшення рівня цілісності в процесі квантування.



Рисунок 4.7.а. – Відновлений відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі обробки базового кадру на основі методу SABAS



Рисунок 4.7.б. – Відновлений відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі обробки базового кадру на основі методу SBPC



Рисунок 4.8.а. – Відновлений відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі обробки передбаченого кадру на основі методу САВАС



Рисунок 4.8.б. – Відновлений відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі обробки передбаченого кадру на основі методу SBPC

Розглянемо порівняльний вплив методів кодування прогнозно-залишкових блоків систем з компенсацією руху на ефективність стиснення відеоінформаційних потоків.

Оцінювання проводиться в залежності від рівня loss цілісності та коефіцієнта стиснення $\mu(n_{\text{frc}})$ відеопотоку за показниками:

1) інтенсивність $I(n_{\text{frc}})$ стиснутого (кодованого) потоку відеоданих (вираз (4.5));

2) коефіцієнт h балансу між інтенсивністю кодованого відеопотоку та швидкістю S_{tr} передачі даних з використанням інфокомунікаційних мереж (ІКМ):

$$h = I(n_{\text{frc}})/S_{\text{tr}}. \quad (4.14)$$

Оцінка коефіцієнту балансу h інтенсивності відеопотоку кодованого з використанням систем стиснення з різними варіантами обробки прогнозно-залишкових блоків в залежності від рівня loss цілісності представлено на рис. 4.9. Для порівняння обирався відеопоток з параметрами, що представлено в табл. 4.2. Тут приймається, що $i_{\text{px}} = 24$ біта

Таблиця 4.2. – Параметри інтенсивності початкового відеопотоку для різних форматів відеокадру

Формат цифрового відеокадру ($K \times L$)	Інтенсивність початкового відеопотоку з частотою $n_{\text{frc}}=30$, Мбіт
HD (720p) (1280 x 720) $K \times L=0,92$ Мрх	663
Full HD (1080p) (1920 x 1080) $K \times L=2$ Мрх	1440
4K Ultra HD HV 3840 x 2160 $K \times L=8,3$ Мрх	5976
4K UHD 4128 x 3096 $K \times L=12,78$ Мрх	9201

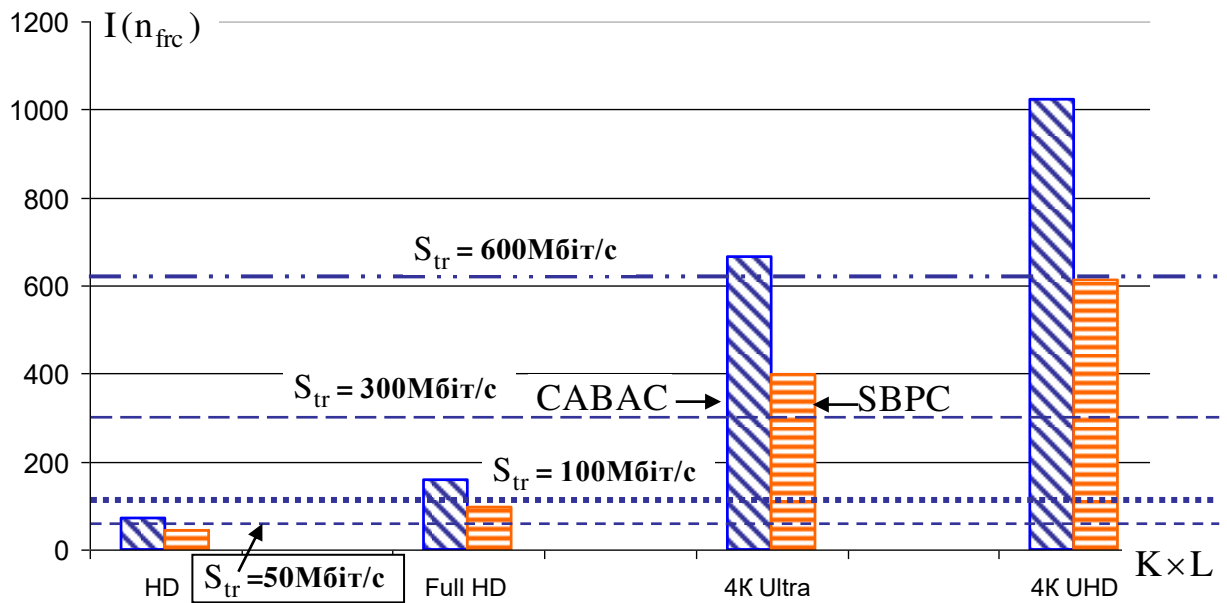


Рисунок 4.9. – Величина $I(n_{frc})$ з використанням систем стиснення з різними варіантами обробки прогнозно-залишкових блоків для $\text{loss}=\text{I}$

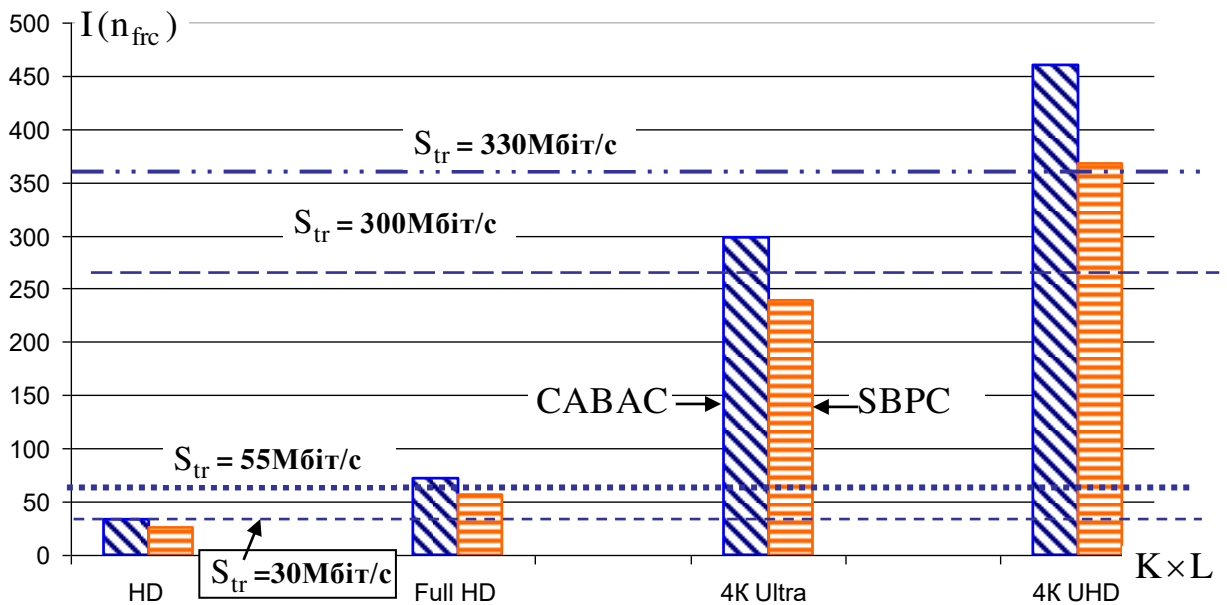


Рисунок 4.10. – Величина $I(n_{frc})$ з використанням систем стиснення з різними варіантами обробки прогнозно-залишкових блоків для $\text{loss}=\text{II}$

Аналізуючи діаграми на рис. 4.9 – 4.10 можна заключити наступне. Використання в системах стиснення з компенсацією руху об'єктів для кодування прогнозно-залишкових блоків розробленого SBPC методу відносно стандартизованого CABAC методу забезпечує:

1) зменшення інтенсивності відеопотоку сягає в середньому на:

- 10 % у разі збереження рівня цілісності з показниками в межах PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99 (рис. 4.9);

- 17 % та 9 %, якщо значення показників визначення рівня цілісності становлять відповідно: PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77 (рис. 4.10, 4.11);

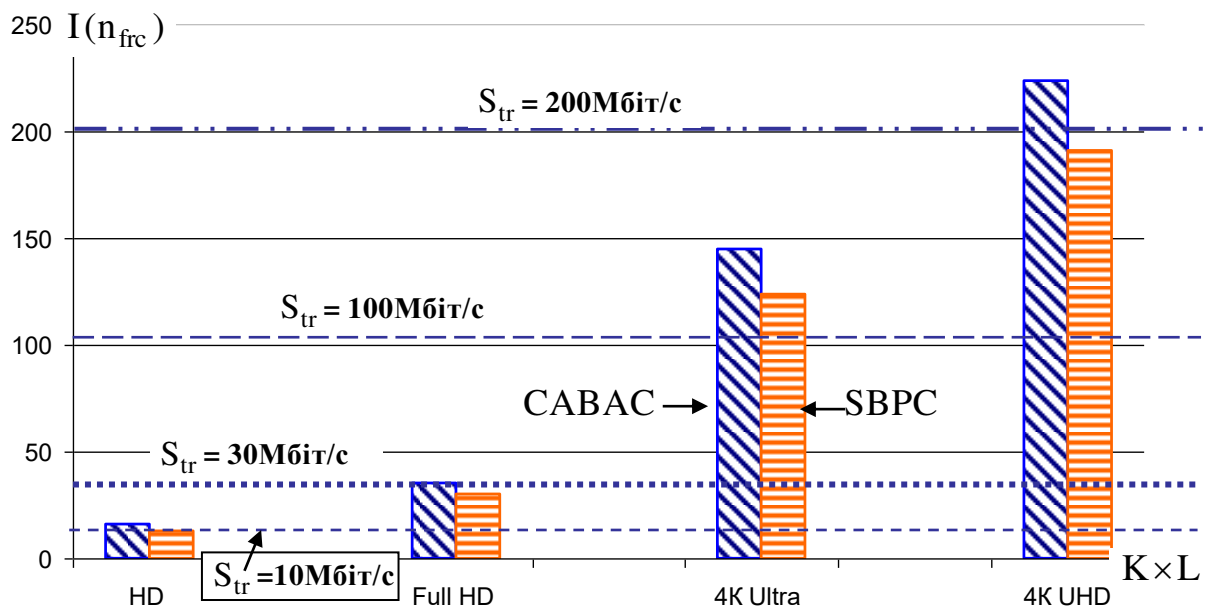


Рисунок 4.11. – Величина $I(n_{frc})$ з використанням систем стиснення з різними варіантами обробки прогнозно-залишкових блоків для $loss=III$

2) умови для передачі в реальному часі відео потоків з частотою 30 кадрів/с такими форматом відеокадрів:

- використанням ІКМ з швидкістю передачі 30 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

- з використанням ІКМ з швидкістю передачі 50 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

- з використанням ІКМ з швидкістю передачі 100 Мбіт/с - Full HD з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

- з використанням ІКМ з швидкістю передачі 350 Мбіт/с: 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K UHD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

3) можливості щодо збільшення частоти кадрів в умовах передачі реального часу, а саме: на 10 кадрів у разі забезпечення рівня цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

4) можливості щодо використання більш енерго-ефективних каналів передачі даних. Це наприклад, є важливою вимогою для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних платформ та роботизованих комплексів;

5) умови для зменшення витрат на формування інфокомунікаційних мереж щодо організацію відео-обміну.

Приклади відновлених відеокадрів у складі групи з використанням для кодування прогнозно-залишкових блоків методів SBPC та САВАС представлено у додатку Б.

Таким чином, на основі викладеного матеріалу досліджень можна заключити. Використання в системах стиснення з компенсацією руху об'єктів для кодування прогнозно-залишкових блоків розробленого SBPC методу відносно стандартизованого САВАС методу забезпечує:

- зменшення інтенсивності відеопотоку;
- умови для передачі в реальному часі відео потоків з частотою 30 кадрів/с з більшим рівнем цілісності та розподільною здатністю;
- можливості щодо збільшення частоти кадрів в умовах передачі реального часу;
- умови для зменшення витрат на формування інфокомунікаційних мереж щодо організацію відео-обміну.

Висновки за четвертим розділом дисертації

1. Сформульовано методологію щодо оцінювання ефективності стиснення для систем з компенсацією руху динамічних об'єктів.

2. Розроблена інформаційна модель для оцінювання об'єму бітового опису компактного синтаксису для розробленого методу. При цьому обліковуються властивості комбінаторної конфігурації структурованої трансформанти ПЗ-блоку в нерівномірно-діагональному форматі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування. Скорочення кількості надмірності досягається на основі врахування структурно-комбінаторних та психовізуально-комбінаторних залежностей в нерівномірно-діагональному представленні структурованої трансформанти прогнозно-залишкового блоку. Такі залежності в напрямку транс-діагоналей проявляються в наявності наступних характерних особливостей:

- наявності стійкого структурного патерну щодо неоднорідності першого порядку, тобто виконання умови нерівності суміжних квант-компонент транс-діагоналі;

- виключення впливу діапазонів низькочастотних компонент на збільшення розмаху можливих значень квант-компонент у високо частотній області трансформанти. Звідси більш характерно окреслюються обмеження на значення діапазонів квант-компонент.

3. Для створеного методу забезпечуються наступні значення рівня стиснення в залежності від складності контенту відео блоку:

- від 3,2 до 6,5 разів при забезпечені рівня цілісності за PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99;

- від 6,5 до 8,5 разів у разі забезпечення рівня цілісності за PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

- від 9 до 33 разів, якщо рівня цілісності дорівнює за PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77.

4. Розроблений метод має перевагу за рівнем стиснення відносно стандартизованого методу CABAC, а саме:

- від 20 до 27 % в залежності від складності контенту відео блоку для рівня цілісності відеоінформації з PSNR: 42 – 45 дБ; SSIM: 0,98 – 0,99;

- від 25 до 30 % для інформативних відео блоків в режимі забезпечення цілісності на рівні PSNR: 32 – 37 дБ; SSIM: 0,91 – 0,95.

5. Для розробленого SBPC методу досягається перевага за коефіцієнтом стиснення відносно стандартизованого кодеку CABAC, а саме:

- 1) у разі кодування базових кадрів вона становить від 20 до 25 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків. При цьому відповідно коефіцієнт стиснення для розробленого методу в середньому сягає рівня від 5,2 до 27 разів;

- 2) у разі кодування передбачених кадрів вона становить від 15 до 20 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків. При цьому відповідно коефіцієнт стиснення для розробленого методу в середньому сягає рівня від 7,8 до 39 разів.

6. Використання в системах стиснення з компенсацією руху об'єктів для кодування прогнозно-залишкових блоків розробленого SBPC методу відносно стандартизованого CABAC методу забезпечує:

- 1) зменшення інтенсивності відеопотоку сягає в середньому на:

- 10 % у разі збереження рівня цілісності з показниками в межах PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99;

- 17 % та 9 %, якщо значення показників визначення рівня цілісності становлять відповідно: PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

- 2) умови для передачі в реальному часі відео потоків з частотою 30 кадрів/с такими форматом відеокадрів:

- використанням ІКМ з швидкістю передачі 30 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

- з використанням ІКМ з швидкістю передачі 50 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

- з використанням ІКМ з швидкістю передачі 100 Мбіт/с - Full HD з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

- з використанням ІКМ з швидкістю передачі 350 Мбіт/с: 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K UHD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

3) можливості щодо збільшення частоти кадрів в умовах передачі реального часу, а саме: на 10 кадрів у разі забезпечення рівня цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

4) можливості щодо використання більш енерго-ефективних каналів передачі даних. Це наприклад, є важливою вимогою для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних платформ та роботизованих комплексів;

5) умови для зменшення витрат на формування інфокомунікаційних мереж щодо організацію відео-обміну.

Результати науково-прикладних досліджень, які викладено в четвертому розділі дисертаційної роботи опубліковано та апробовано в наступних працях [11; 42; 94; 115].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена *науково-прикладна задача*, яка стосується зниження інтенсивності відеопотоку для забезпечення балансу та підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. Розроблено метод кодування прогнозно-залишкових блоків в структурованому спектральному просторі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування. В процесі стиснення додатково враховуються стійкі патерні структурного походження в спектральному просторі стосовно обмеженості розмаху зміни значень квант-компонент транс-діагоналей та виконання умови неоднорідності першого порядку. Це забезпечує додаткове зниження інтенсивності відеопотоку та забезпечує баланс з швидкістю передачі даних в інфокомунікаційних мережах без втрат цілісності.

Розвиток інфокомунікаційних систем та мереж (ІКМ) має одне з ключових значень для зміцнення обороноздатності та науково-технічного потенціалу, сталого розвитку економіки, промисловості та суспільства. Однак в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій (антропогенного, техногенного або природного походження) виникають значні ризики втрати ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж (ІКМ). Основними чинниками тут можуть бути: руйнування сегментів інфокомунікаційних систем та мереж, пошкодження телекомунікаційної інфраструктури (наприклад, внаслідок вогневого ураження засобів телекомунікації); вивід із ладу джерел енергопостачання для телекомунікаційного обладнання (наприклад, виникнення критичності енерго-запасу антен мобільного зв'язку або Wi-Fi-роутерів); використання засобів РЕБ для здійснення перешкод в процесі передачі інформації з використанням бездротових каналів зв'язку; перехват управління БПЛА, як платформи для реєстрації та передачі інформації; виконання оперативних завдань в складних умовах місцевості, що обмежує можливість використання більш потужних засобів ІКМ;

унеможливлення використання дротових ІКМ. Це спричиняє потребу застосовувати бездротові канали, які характеризуються відносно меншою швидкістю передачі даних.

Водночас збільшується потреба у підвищенні якості надання відеоінформаційних послуг. Це зумовлено: збільшенням швидкості передачі інфокомунікаційних мереж, що збільшує попит до більш високої якості відеопотоку; використанням штучного інтелекту в системах аналізу та прийняття рішень; підвищенням продуктивності обчислювальних систем сприяє розвитку робототехніки та технологій комп'ютерного зору.

При цьому можливості сучасних систем стиснення не забезпечують баланс між: інтенсивністю кодованого відеопотоку з потрібним рівнем розподільної здатності та цілісності; рівнем швидкості передачі даних для найбільш розповсюджених на практиці ІКМ.

Рівень дисбалансу в залежності від швидкості передачі, рівня цілісності та типу формату відеокадру може сягати від 30 до 90 %. Це призводить до втрат оперативності доставки відеопотоку. Водночас у разі збільшення рівня стиснення на основі використання існуючих систем будуть виникати значні втрати цілісності. Отже виникає відповідне протиріччя.

Одним з ключових технологічних етапів системи стиснення (HEVC) з компенсацією руху є процес ентропійного кодування прогнозно-залишкових блоків в квантовано-спектральному просторі. Однак подальший розвиток стандартизованих підходів має певні обмеження. Це стосується складнощів щодо виявлення статистичних залежностей в спектральному просторі прогнозно-залишкових блоків, які мають підвищений інформативний рівень.

Звідси необхідно в комплексі з методами ентропійного кодування використовувати інші підходи до обробки прогнозно-залишкових блоків. Пропонується напрямок врахування наявних структурних патернів в спектральному просторі ПЗ-блоків. Такий напрямок зумовлено можливістю виявлення структурних патернів для блоків даних з обмеженим статистичним характером.

Таким чином *мета дисертаційних досліджень* стосується розробки методу кодуванням 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.

Основні наукові результати:

1. Розроблено метод встановлення стійких спектрально-структурних патернів для транс-діагональних послідовностей в процесі квантування спектрального простору прогнозно-залишкових блоків. Метод базується на досягненні умови неоднорідності першого порядку для транс-діагоналей в процесі квантування на основі аналізу інформації за двома компонентами: квант-компоненти, що передують поточній у транс-діагоналі; перед-квантове значення поточної компоненти транс-діагоналі. При цьому враховується нерівномірно-діагональний формат індексації спектрального простору прогнозно-залишкових блоків.

2. Розроблена математична модель для оцінювання кількості інформації в послідовностях нерівномірно-діагонального формату структурованого спектрального простору прогнозно-залишкових блоків за обліком наступних особливостей:

1) трансформанта будується для прогнозно-залишкових блоків в режим Intra та Inter передбачення з використанням дискретного косинусного перетворення;

2) для ПЗ-блоку в процесі квантування його спектрального простору забезпечується наявність стійкого структурно-спектрального патерну щодо неоднорідності першого порядку для структурованих квант-компонент транс-діагоналей;

3) для значень квант-компонент транс-діагоналей виконується обмеження на діапазон можливих значень в залежності від їх позиції з врахуванням умови неоднорідності першого порядку.

4) система індексації прогнозно-залишкових блоків у спектральному просторі відповідає нерівномірно-діагонального формату;

5) передбачається, що визначення кількості інформації в ПЗ-блоці у *структурованому* спектральному просторі визначається з врахуванням рівня інформативності окремих транс-діагоналей.

3. Розроблено метод структурно-зумовленого позиційного кодування послідовностей в нерівномірно-діагональному форматі структурованого спектрального простору прогнозно-залишкового блоку. Це створює реалізацію базового етапу загальних функціональних перетворень щодо побудови компактного опису в системі стиснення з компенсацією руху об'єктів.

4. Розроблено теоретичні засади для декодування кодових значень структурно-зумовлених позиційних чисел зважанням комбінаторної конфігурації трансформанти за пірамідальною текстурою. Сюди відносяться наступні аспекти:

4.1. Побудована система вирішального правила для визначення адитивної інформативно-позиційної ваги, яка включає значення поточного старшого елементу SBP-числа. В основі даного правила лежать:

- математичне співвідношення для наближеного оцінювання кодового значення SBP-числа відносно його адитивних складових за старшим елементом.

- властивості позиційного базису, які дозволяють наближено встановити нижню та верхню межі зміни кодового значення в структурно-зумовленому позиційному просторі.

4.2. Створено вирішальне правило для вилучення поточного старшого елементу SBP-числа з відповідного інформативно-позиційного базису. В основі правила лежить синтезована функціональна залежність значення поточного старшого елементу SBP-числа від його ваги та поточного кодового значення. Синтез стосується нормалізації співвідношення для наближеного оцінювання поточного кодового значення та послідуєчого

виключення ваги поточного старшого елемента SBP-числа. *Це формує необхідну умову для відновлення елементів структурно-зумовлених позиційних чисел.*

5. Розроблено метод незалежного відновлення елементів за їх довільною позицією в SBP-числі шляхом безпосереднього використання початкового кодового значення. Даний метод базується на використанні системи вирішальних правил щодо встановлення потрібної інформативно-позиційної ваги та безпосереднього вилучення довільного елемента SBP-числа з використанням співвідношення щодо наближеного оцінювання кодового значення.

6. Розроблена інформаційна модель для оцінювання об'єму бітового опису компактного синтаксису для розробленого методу. При цьому обліковуються властивості комбінаторної конфігурації структурованої трансформанти ПЗ-блоку в нерівномірно-діагональному форматі на основі структурно-зумовленого позиційного кодування.

7. Дисертаційні дослідження проводились в рамках НДР “Розроблення методів і засобів обробки ансамблю сигналів і розпізнавання радіовипромінюючих джерел та об'єктів в умовах апріорної невизначеності ” ДРН №0119U001406.

8. Результати досліджень прийняті до впровадження в: ТОВ «ЮНЕЙ ДЕФЕНС» (акт реалізації від 19.11.2025р.); ТОВ «Одеський авіаційний завод» (акт реалізації від 04.10.2025 р.).

9. Таким чином, мета дослідження щодо розробки методу кодуванням 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, досягнута і всі часткові завдання вирішені повністю. Наукові результати є внеском у розвиток теоретичних основ та методів кодування в системах стиснення з компенсацією руху динамічних об'єктів.

10. Основні результати дисертаційних досліджень можуть бути впровадженні в системах та центрах аналізу інформації та прийняття рішень з використанням інтелектуальних технологій.

Основні практичні результати дослідження:

1. Для створеного методу забезпечуються наступні значення рівня стиснення в залежності від складності контенту відео блоку: від 3,2 до 6,5 разів при забезпеченні рівня цілісності за PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; від 6,5 до 8,5 разів у разі забезпечення рівня цілісності за PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; від 9 до 33 разів, якщо рівня цілісності дорівнює за PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77.

2. Розроблений метод має перевагу за рівнем стиснення відносно стандартизованого методу CABAC, а саме: від 20 до 27 % в залежності від складності контенту відео блоку для рівня цілісності відеоінформації з PSNR: 42 – 45 дБ; SSIM: 0,98 – 0,99; від 25 до 30 % для інформативних відео блоків в режимі забезпечення цілісності на рівні PSNR: 32 – 37 дБ; SSIM: 0,91 – 0,95.

3. Для розробленого SBPC методу досягається перевага за коефіцієнтом стиснення відносно стандартизованого кодеку CABAC, а саме:

1) у разі кодування базових кадрів вона становить від 20 до 25 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків. При цьому відповідно коефіцієнт стиснення для розробленого методу в середньому сягає рівня від 5,2 до 27 разів;

2) у разі кодування передбачених кадрів вона становить від 15 до 20 % в залежності від рівня забезпечення цілісності їх відео блоків. При цьому відповідно коефіцієнт стиснення для розробленого методу в середньому сягає рівня від 7,8 до 39 разів.

4. Використання в системах стиснення з компенсацією руху об'єктів для кодування прогнозно-залишкових блоків розробленого SBPC методу відносно стандартизованого CABAC методу забезпечує:

1) зменшення інтенсивності відеопотоку сягає в середньому на: 10 % у разі збереження рівня цілісності з показниками в межах PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 17 % та 9 %, якщо значення показників визначення рівня цілісності становлять відповідно: PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77;

2) умови для передачі в реальному часі відео потоків з частотою 30 кадрів/с такими форматом відеокадрів :за умов використання ІКМ з швидкістю передачі: 30 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77; 50 Мбіт/с: HD (720p) з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; Full HD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95; 100 Мбіт/с - Full HD з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 23 – 28 дБ та SSIM: 0,62 – 0,77; 350 Мбіт/с: 4K Ultra HDHV з рівнем цілісності PSNR: 42 – 45 дБ та SSIM: 0,98 – 0,99; 4K UHD з рівнем цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

3) можливості щодо збільшення частоти кадрів в умовах передачі реального часу, а саме: на 10 кадрів у разі забезпечення рівня цілісності PSNR: 32 – 37 дБ та SSIM: 0,91 – 0,95;

4) можливості щодо використання більш енерго-ефективних каналів передачі даних. Це наприклад, є важливою вимогою для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних платформ та роботизованих комплексів;

5) умови для зменшення витрат на формування інфокомунікаційних мереж щодо організацію відео-обміну.

Достовірність результатів щодо оцінювання ефективності систем стиснення з компенсацією руху об'єктів підтверджується наступним:

1. Адекватністю результатів стосовно оцінювання коефіцієнту стиснення та інтенсивності відеопотоку з допустимим рівнем цілісності, які отримано з використанням математичних моделей та на основі проведення

експериментальних досліджень з обробки реалістичних відео потоків на основі програмної реалізації створених методів кодування.

2. Узгодженістю між процесом відновлення ПЗ-блоків з використанням розробленого методу та етапами стандартизованої системи відновлення відеокадрів на основі вже наявної інформації щодо ПЗ-блоків.

3. Аналізом відновлених відеокадрів у потоці, щодо відсутності значимих артефактів та візуальних спотворень в режимах допустимого рівня цілісності.

4. Коректним використанням математичного апарату усічено-позиційних кодових систем для розробки методів кодування та відновлення трансформант прогнозно-залишкових блоків.

Результати дисертаційної роботи доцільно використати:

- для безпілотних платформ в інфокомунікаційних комплексах щодо передачі інформації з, в тому числі в інтересах підрозділів та структур Сил Оборони України;
- в системах АСУ для організації оперативного та достовірного обміну інформацією;
- в системах надання інформаційних сервісів, в тому числі відеоінформаційних;
- для центрів аналізу та прийняття рішень в кризових ситуаціях для організації своєчасної інформаційної підтримки;
- в системах управління критичної інфраструктури, для забезпечення моніторингу та об'єктивного контролю.
- при викладанні навчальних дисциплін з мультимедійної обробки; цифрової обробки зображень та кодування для підготовки фахівців у ВНЗ України.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Алімпієв А. М. Теоретичні основи створення методів протидії прихованим інформаційним атакам в сучасній гібридній війні / А. М. Алімпієв, В. В. Бараннік, Т. В. Белікова, С. О. Сідченко // Системи обробки інформації. – Харків : ХНУПС, 2017. – Вип. 4 (150). – С. 113–121.

2. Бараннік В. В. Метод кодування значимих за впливом на семантичну цілісність відеосегментів для забезпечення доступності / В. В. Бараннік, Ю. М. Бабенко, В. В. Бараннік, В. О. Колесник // Наукоємні технології. – 2022. – Т. 54, № 2. – С. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.54.16749>.

3. Бараннік В. В. Метод маскувального ущільнення службових даних в системах компресії відеозображень / В. В. Бараннік, С. О. Сідченко, Н. В. Бараннік, А. М. Хіменко // Радіoeлектронні і комп'ютерні системи. – 2021. – № 2. – С. 51–63. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.2.05>.

4. Баранник В. В. Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В. В. Баранник, Ю. В. Стасев, Н. А. Королева. – Харьков : ХУПС, 2009. – 252 с.

5. Бараннік В. В. Метод підвищення інформаційної безпеки в системах відеомоніторингу кризових ситуацій : монографія / В. В. Бараннік, О. С. Куліца. – Черкаси, 2015. – 143 с.

6. Бараннік В. В. Технологія ковзного кодування нерівномірних діагональних послідовностей в двовимірному спектральному просторі трансформанти / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Ю. М. Бабенко, Р. С. Онищенко, Т. В. Белікова, О. О. Ігнат'єв // Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2023. – № 94. – С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.94.13-23>.

7. Бараннік В. В. Метод усічено-позиційного декодування трансформант за нерівномірно-діагональним форматом / В. В. Бараннік, К. В.

Ревва, С. С. Шульгін, Д. В. Бараннік, Р. С. Оніщенко // Наукоємні технології. – 2023. – № 3. – С. 280–288. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17949>.

8. Бараннік В. В. Метод формування інформативно-позиційної ваги для усічено-позиційної кодової системи представлення трансформованих відеосегментів / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Р. С. Оніщенко, О. О. Ігнат'єв // Наукоємні технології. – 2023. – № 2. – С. 156–163. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.58.17652>.

9. Бараннік В. В. Метод відновлення в системах стиснення для забезпечення цілісності відеоданих / В. В. Бараннік, К. В. Ревва // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т. 36 (75), № 6, ч. 1. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/07>.

10. Бараннік В. В. Метод декодування компонент трансформант за діагонально-локаційним форматом / В. В. Бараннік, К. В. Ревва // Наукоємні технології. – 2025. – Вип. 68, № 4. – С. 479. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.19047>.

11. Бараннік В. В. Метод оцінювання ефективності усічено-позиційного кодування для інфокомунікаційних систем / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, Д. В. Бараннік, Р. С. Оніщенко, М. В. Бабенко // Наукоємні технології. – 2024. – № 2. – С. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18711>.

12. Бараннік В. В. Метод стиснення зображень на основі нерівновагового позиційного кодування бітових площин / В. В. Бараннік, Н. К. Гулак, Н. А. Корольова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 1. – С. 84–92. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2009_1_13.

13. Бараннік В. В. Основи теорії структурно-комбінаторного стеганографічного кодування : монографія / В. В. Бараннік, Д. В. Бараннік, А. Е. Бекиров. – Харків : Лідер, 2017. – 256 с.

14. Бараннік В. В. Рельєфне представлення зображень пірамідальним кодуванням / В. В. Бараннік // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 1. – С. 17–25.

15. Бараннік В. В. Кодування трансформованих зображень в інфокомунікаційних системах / В. В. Бараннік, В. П. Поляков. – Харків : ХУПС, 2010. – 234 с.

16. Бараннік В. В. Метод зберігання елементів службових складових криптокомпресійних кодограм відеозображень / В. В. Бараннік, С. О. Сідченко, Д. В. Бараннік [та ін.] // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2023. – № 92. – С. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.92.28-40>.

17. Бараннік В. В. Модель інформативного опису спектрального простору відеосегментів за діагонально-нерівномірною текстурою / В. В. Бараннік, С. С. Шульгін, Р. С. Онищенко [та ін.] // Наукоємні технології. – 2022. – № 4 (56). – С. 259–267. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.56.17124>.

18. Білінський Й. Й. Методи обробки зображень в комп'ютеризованих оптико-електронних системах : монографія / Й. Й. Білінський. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 272 с.

19. Бурячок В. Л. Основи формування державної системи кібернетичної безпеки : монографія / В. Л. Бурячок. – К. : НАУ, 2013. – 432 с.

20. Інформаційні технології. Високоєфективне кодування та доставляння аудіовізуальної інформації в неоднорідних середовищах. Частина 2. Високоєфективне відеокодування. ДСТУ ISO/IEC 23008-2:2018 (ISO/IEC 23008-2:2017, IDT). – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358774-18>.

21. Кривуца В. Г. Інфокомунікаційні мережі нового покоління : монографія / В. Г. Кривуца, Л. Н. Беркман, С. В. Толюпа. – Київ : ДУІКТ, 2012. – 286 с.

22. Малінін І. Г. Селективне шифрування відеоінформації на основі семантичної сегментації з використанням нейронної мережі U-net / І. Г. Малінін, Ю. Ю. Коляденко, Б. Ю. Жураковський, О. Коваленко, В. Ралько //

Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. – 2025. – Т. 5, № 2.
– С. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.23939/ict2025.02.038>

23. Романчук В. І. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / В. І. Романчук, Б. М. Стрихалюк, І. В. Демидов, М. І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – № 6(34). – С. 82–92.

24. Свириденко В. А. Аналіз систем з стисненням даних : монографія / В. А. Свириденко. – Київ : Зв'язок, 1978. – 183 с.

25. Толюпа С. В. Обґрунтування підходу до технології трансформації та кодування в системах приховування та стиснення відеозображень / С. В. Толюпа, С. В. Наконечний, О. Г. Плющ, О. І. Ведмідь, Д. В. Сіненко // Наукоємні технології. – 2024. – № 4(64). – С. 495–501. DOI: [10.18372/2310-5461.63.19759](https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.19759).

26. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике : учебник / К. Шеннон. – [Б. м.] : изд. иностр. лит., 1963. – 793 с.

27. Юдін О. К. Метод кодування фрагментів-контейнерів в спектрально-параметричному просторі / О. К. Юдін, Ю. Ю. Коляденко, Ю. В. Цімура, В. П. Єрошенко // Наукоємні технології. – 2024. – № 1. – С. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18513>.

28. Юдін О. К. Модель оцінювання інформативності спектрально-параметричного опису трансформованих відеофрагментів / О. К. Юдін, Ю. Ю. Коляденко, Ю. В. Цімура, Щ. Мельников, П. М. Гуржій // Наукоємні технології. – 2023. – № 4. – С. 423–429. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.60.18272>.

29. Alvar S. R. Lossless Intra Coding in HEVC with Adaptive 3-tap Filters / S. R. Alvar, F. Kamisli // CoRR. – 2016. – arXiv:1604.07051. – DOI: [10.48550/arXiv.1604.07051](https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.07051).

30. Alakuijala J. JPEG XL Next-Generation Image Compression Architecture and Coding Tools / J. Alakuijala, R. van Asseldonk, S. Boukortt [et

al.] // Proceedings of the SPIE – Applications of Digital Image Processing XLII. – 2019. – Vol. 11137. – Art. no. 111370K. DOI: 10.1117/12.2529237.

31. Alimpiev A. The video information resources integrity concept by using binomial slots / A. Alimpiev, V. Barannik, S. Podlesny [et al.] // 2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) : proceedings (Lviv, Ukraine, 22–26 May 2017). – Lviv : IEEE, 2017. – P. 193–196. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2017.7937564.

32. Ballé J. Variational image compression with a scale hyperprior / J. Ballé, D. Minnen, S. Singh [et al.]. // 2018. – (Preprint / arXiv:1802.01436). – URL: <https://arxiv.org/abs/1802.01436>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.01436>.

33. Barannik V. Method of Coding Subbands of Non-Homogeneous Spectrum of Video Segments in Uneven Diagonal Space / V. Barannik, S. Shulgin, N. Barannik, V. Barannik // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Kyiv, Ukraine, 15–17 Dec. 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 72–75. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024236.

34. Barannik V. Method of Compression and Ensuring the Fidelity of Video Images in Infocommunication Networks / V. Barannik, A. Krasnorutsky, V. Kolesnyk [et al.] // Radioelectronic and Computer Systems. – 2022. – No. 4. – P. 129–142. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.10>.

35. Barannik V. Method of Coding Video Images Based on Meta-Determination of Segments / V. Barannik [et al.] // Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications (TCSET 2024) / ed. by A. Luntovskyy [et al.]. – Cham : Springer, 2024. – P. 387–400. – (Lecture Notes in Electrical Engineering ; vol. 1198). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_27.

36. Barannik V. Integration the non-equilibrium position encoding into the compression technology of the transformed images / V. Barannik, Y. Ryabukha, V. Tverdokhlib [et al.] // 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)

: proceedings (Novi Sad, Serbia, 29 Sept.–2 Oct. 2017). – Novi Sad : IEEE, 2017. – P. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110030.

37. Barannik V. Processing Marker Arrays of Clustered Transformants for Image Segments / V. Barannik [et al.] // Emerging Networking in the Digital Transformation Age (TCSET 2022) / ed. by M. Klymash [et al.]. – Cham : Springer, 2023. – P. 343–353. – (Lecture Notes in Electrical Engineering ; vol. 965). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_25.

38. Barannik V. Evaluation of Effectiveness of Masking Methods of Aerial Photographs / V. Barannik, D. Barannik, V. Fustii, M. Parkhomenko // 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2–6 July 2019). – Lviv : IEEE, 2019. – P. 415–418. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847820.

39. Barannik V. Devising a Conceptual Method for Generating Cryptocompression Codograms of Images without Loss of Information Quality / V. Barannik, S. Sidchenko, D. Barannik [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 4, no. 2 (112). – P. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237359>.

40. Barannik V. Method of Safety of Informational Resources Utilizing the Indirect Steganography / V. Barannik, D. Barannik, A. Bekirov [et al.] // Engineer of the XXI Century (EngineerXXI 2018) / ed. by S. Zawiślak, J. Rysiński. – Cham : Springer, 2020. – P. 191–203. – (Mechanisms and Machine Science ; vol. 70). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4_17.

41. Barannik V. V. Coding tangible component of transforms to provide accessibility and integrity of video data / V. V. Barannik, A. V. Hahanova, V. N. Krivonos // 2013 East-West Design & Test Symposium (EWDTS) : proceedings (Rostov on Don, Russia, 27–30 Sept. 2013). – Rostov on Don : IEEE, 2013. – P. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673179.

42. Barannik V. Method of Integrating Infocommunication Technology for Encoding Video Segments into Standardized Platforms / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, M. Babenko, O. Shaigas, G. Pris // 2024 IEEE 17th International

Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 42–47. DOI: 10.1109/TCSET64720.2024.10755845.

43. Barannik V. Technique for encoding clustered transformants in differentially-normalized space / V. Barannik, K. Revva, E. Eliseev, M. Babenko, O. Yudin, O. Yudin, Y. Tsimura // CH&CMiGIN'25: Fourth International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Kyiv, Ukraine, 20–22 June 2025). – URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4024/short08.pdf>.

44. Barannik V. Method for Creating the Concept of Compression Encoding Transformed Segments / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, M. Babenko, P. Pertsev, S. Fediuk // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222418.

45. Barannik V. Model Functional Transformations for Formation Syntactic Description Diagonals Transformer / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, Y. Babenko, M. Komarov, O. Matviichuk-Yudina // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 65–71. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222435.

46. Barannik V. Video Data Compression Methods in the Decision Support Systems / V. Barannik, O. Yudin, Y. Boiko, R. Ziubina, N. Vyshnevskaya // Advances in Computer Science for Engineering and Education (ICCSEEA 2018) / ed. by Z. Hu [et al.]. – Cham : Springer, 2019. – P. 1–10. – (Advances in Intelligent Systems and Computing ; vol. 754). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_30.

47. Barannik V. A Method of Scrambling for the System of Cryptocompression of Codograms Service Components / V. Barannik [et al.] // Emerging Networking in the Digital Transformation Age (TCSET 2022) / ed. by M. Klymash [et al.]. – Cham : Springer, 2023. – P. 333–342. – (Lecture Notes in

Electrical Engineering ; vol. 965). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_26.

48. Barannik V. Description of the OFDM Symbol with the Help of Mathematical Laws. Analysis of Technologies that Were Used in This Case / V. Barannik, M. Lytvinenko, D. Okladnoy, O. Suprun // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT 2017) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2017). – Lviv : IEEE, 2017. – Art. no. 8020095. – P. 183–187. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020095.

49. Barannik V. Quadrature Compression of Images in Polyadic Space / V. Barannik, A. Shiryaev // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012) : proceedings (Lviv-Slavsko, Ukraine, 2012). – Lviv-Slavsko : IEEE, 2012. – P. 422. ISBN: 978-617607208-9.

50. Barannik V. A Method to Control Bit Rate while Compressing Predicted Frames / V. Barannik, N. Kharchenko, O. Y. Othman Shadi, A. Musienko // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2015). – Lviv : IEEE, 2015. – P. 36–38. DOI: 10.1109/CADSM.2015.7230789.

51. Barannik V. Method Taking into Account Level of Structural and Statistical Saturation of Video Segments in the Coding Process / V. Barannik, Y. Babenko, V. Barannik, V. Kolesnyk, D. Zhuikov // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Kyiv, Ukraine, 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 66–71. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024193.

52. Barannik V. Method of Recurrent Truncated-Positional Coding Video Segments in Uneven Diagonal Space / V. Barannik, S. Shulgin, V. Kozlovskiy, R. Onyshchenko, T. Belikova, O. Ihnatiev, V. Khlopiachyi // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. – № 2. – P. 129–142. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.11>.

53. Barannik V. Development Method of Complex Steganographic Embedding of Information in the Structural-Psychovisual Space / V. Barannik, D. Barannik, M. Babenko, R. Prokopenko, O. Akimov, N. Petrukha // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2026. – № 1 (139). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.351181>.

54. Barannik V. Indirect Information Hiding Technology on a Multiadic Basis / V. Barannik, N. Barannik, O. Slobodyanyuk // *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. – 2021. – Vol. 11, No. 4. – P. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2812>.

55. Barannik D. Steganographic Coding Technology for Hiding Information in Infocommunication Systems of Critical Infrastructure / D. Barannik, V. Barannik // *2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Kyiv, Ukraine, 2022)*. – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 88–91. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024185>.

56. Barannik V. Architectural Presentation of Isotopic Levels of Relief of Images / V. Barannik, A. Hahanova, A. Slobodyanyuk // *IEEE 10th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) : proceedings (Polyana, Ukraine, 2009)*. – Polyana : IEEE, 2009. – P. 385–387.

57. Barannik V. Method of the 3-D Image Processing / V. Barannik, S. Karpenko // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) : proceedings (Lviv-Slavsko, Ukraine, 2008)*. – Lviv-Slavsko : IEEE, 2008. – P. 378–380.

58. Blau Y. Rethinking lossy compression: The rate-distortion-perception tradeoff / Y. Blau, T. Michaeli // *International Conference on Machine Learning (ICML) : proceedings*. – [S.l.] : PMLR, 2019. – P. 675–685. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.07821>.

59. Bondžulić B. Efficient Prediction of the First Just Noticeable Difference Point for JPEG Compressed Images / B. Bondžulić, N. Stojanović, V. Petrović [et

al.] // Acta Polytechnica Hungarica. – 2021. – Vol. 18 (8). – P. 201–220. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.18.8.2021.8.11>.

60. Bondžulić B. P. Picture-wise just noticeable difference prediction model for JPEG image quality assessment / B. P. Bondžulić, B. Z. Pavlović, N. M. Stojanović, V. S. Petrović // Vojnotehnicki glasnik (Military Technical Courier). – 2022. – Vol. 70 (1). – P. 62–86. DOI: <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-34739>.

61. Bossen F. HEVC Complexity and Implementation Analysis / F. Bossen, B. Bross, K. Suhring, D. Flynn // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1685–1696. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2221255](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2221255).

62. Boyce J. M. Overview of SHVC: Scalable Extensions of the High Efficiency Video Coding Standard / J. M. Boyce, Y. Ye, J. Chen, A. K. Ramasubramonian // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2016. – Vol. 26, No. 1. – P. 20–34. DOI: [10.1109/TCSVT.2015.2461951](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2461951).

63. Bross B. Overview of the Versatile Video Coding (VVC) Standard and its Applications / B. Bross [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2021. – Vol. 31, no. 10. – P. 3736–3764. DOI: [10.1109/TCSVT.2021.3101953](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2021.3101953).

64. Budagavi M. Core Transform Design in the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard / M. Budagavi, A. Fuldseth, G. Bjøntegaard [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2013. – Vol. 7, No. 6. – P. 1029–1041. DOI: [10.1109/JSTSP.2013.2270429](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2013.2270429).

65. Chen J. Coding Tools Investigation for Next Generation Video Coding Based on HEVC / J. Chen, Y. Chen, M. Karczewicz, X. Li, H. Liu, L. Zhang, X. Zhao // *Applications of Digital Image Processing XXXVIII : Proceedings of SPIE*. – San Diego, CA, USA, 2015. – Vol. 9599. – Art. 95991B. – DOI: [10.1117/12.2193681](https://doi.org/10.1117/12.2193681).

66. Chi C. C. Parallel Scalability and Efficiency of HEVC Parallelization Approaches / C. C. Chi, M. Alvarez-Mesa, J. Lucas [et al.] // IEEE Transactions on

Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1827–1838. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2223056](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2223056)

67. Cho S. Fast CU Splitting and Pruning for Suboptimal CU Partitioning in HEVC Intra Coding / S. Cho, M. Kim // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2013. – Vol. 23, No. 9. – P. 1555–1564. DOI: [10.1109/TCSVT.2013.2249017](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2013.2249017).

68. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. – 2020. – URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>. (Дата звернення: 29.05.2025).

69. Dahlman E. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – 2nd ed. – Academic Press, 2020. – 526 p. ISBN: 978-0-12-822320-8.

70. Davie B. S. MPLS: Technology and Applications / B. S. Davie, Y. Rekhter. – San Francisco, CA : Morgan Kaufmann, 2000. – 498 p. ISBN: 978-1-558-60656-1.

71. De Decker A. No-Reference VMAF: A Deep Neural Network-Based Approach to Blind Video Quality Assessment / A. De Decker, J. De Cock, P. Lambert, G. Van Wallendael // IEEE Transactions on Broadcasting. – 2024. – Vol. 70, No. 3. – P. 844–861. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBC.2024.3399479>.

72. Del Portillo I. A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband / I. del Portillo, B. G. Cameron, E. F. Crawley // *Acta Astronautica*. – 2019. – Vol. 159. – P. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.040>.

73. Egiazarian K. O. Adaptive denoising and lossy compression of images in transform domain / K. O. Egiazarian, J. T. Astola, M. P. Helsingius, P. Kuosmanen // Journal of Electronic Imaging. – 1999. – Vol. 8, No. 3. – P. 233–245. – DOI: [10.1117/1.482673](https://doi.org/10.1117/1.482673).

74. Ericsson Mobility Report. – June 2023. – Stockholm : Ericsson, 2023. – 36 p. – URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/june-2023>. (Дата звернення: 18.03.2024).

75. Esenlik S. An Overview of the JPEG AI Learning-Based Image Coding Standard / S. Esenlik, Y. Wu, Z. Zhang [et al.]. – 2025. – (Preprint / arXiv:2510.13867). – URL: <https://arxiv.org/abs/2510.13867>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.13867>.

76. Fang Y. Distributed Arithmetic Coding for Uniform Sources / Y. Fang // IEEE Transactions on Information Theory. – 2023. – Vol. 69, no. 1. – P. 47–74. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIT.2022.3221289>.

77. Flynn D. Quantization in HEVC / D. Flynn, J. Sole, T. Suzuki // In: Sze V. et al. (Eds.) High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. – Springer, 2014. – Ch. 8. DOI: 10.1007/978-3-319-06895-4_8.

78. Flynn D. Overview of the Range Extensions for the HEVC Standard: Tools, Profiles, and Performance / D. Flynn, G. J. Farinella, G.-H. Gweon [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2016. – Vol. 26, No. 1. – P. 4–19. DOI: 10.1109/TCSVT.2015.2478707.

79. Fotovvat A. Selective Encryption of VVC Encoded Video Streams for the Internet of Video Things / A. Fotovvat, K. Wahid. – 2021. – (Preprint / arXiv:2103.14844). – URL: <https://arxiv.org/abs/2103.14844>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.14844>.

80. Haub F. HEVC Inter Coding Using Deep Recurrent Neural Networks and Artificial Reference Pictures / F. Haub, T. Laude, J. Ostermann // *arXiv preprint*. – 2018. – arXiv:1812.02137 [cs.MM]. – DOI: 10.48550/arXiv.1812.02137.

81. Hao X. A No-Reference Quality Assessment Method for Hyperspectral Sharpened Images via Benford's Law / X. Hao, X. Li, J. Wu [et al.] // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 7. – Art. no. 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16071167>.

82. Helle P. Block Merging for Quadtree-Based Partitioning in HEVC / P. Helle, S. Oudin, B. Bross [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1720–1731. DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2223051.

83. Helle P. Inter Prediction in HEVC / P. Helle, S. Oudin, B. Bross, D. Marpe, T. Wiegand // In: Sze V. et al. (Eds.) High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. – Springer, 2014. – Ch. 5. DOI: 10.1007/978-3-319-06895-4_5.
84. Hore A. Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM / A. Hore, D. Ziou // 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR) : proceedings (Istanbul, Turkey, 23–26 Aug. 2010). – Istanbul : IEEE, 2010. – P. 2366–2369. DOI: 10.1109/ICPR.2010.579.
85. Hu Q. Neyman-Pearson-Based Early Mode Decision for HEVC Encoding / Q. Hu, X. Zhang, Z. Shi and Z. Gao // *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 18, no. 3, pp. 379-391, March 2016, doi: 10.1109/TMM.2015.2512799.
86. Huang C.-H. Unveiling the Future of Human and Machine Coding: A Survey of End-to-End Learned Image Compression / C.-H. Huang, J.-L. Wu // *Entropy*. – 2024. – Vol. 26, No. 5. – Art. no. 357. DOI: <https://doi.org/10.3390/e26050357>.
87. Ieremeiev O. Combined visual quality metric of remote sensing images based on neural network / O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Okarma // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2020. – № 4. – P. 4–15. DOI: 10.32620/reks.2020.4.01.
88. ITU-T Recommendation H.265 | ISO/IEC 23008-2. High Efficiency Video Coding. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland. 2013 URL: <https://www.itu.int/myworkspace/t-rec/item?id=11885&lang=en> (дата звернення 25.05.2024).
89. Jayant N. S. Digital Coding of Waveforms: Principles and Applications to Speech and Video / N. S. Jayant, P. Noll. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1984. – 688 p. ISBN: 978-0132119139.
90. Jiang X. Low-complexity enhancement VVC encoder for vehicular networks / X. Jiang, W. Li, T. Song // *EURASIP Journal on Advanced Signal Processing*. – 2023. – Vol. 2023. – Art. no. 122. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01083-2>.

91. Kim J. AI-based content-aware encoding at scale utilizing hardware resources in video ASICs for data center / J. Kim, A. Fomina, E. Baek [et al.] // Applications of Digital Image Processing XLVII : proceedings of SPIE. – 2024. – Vol. 13165. – Art. no. 1316503. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3031558>.

92. Kim I. Block Partitioning Structure in the HEVC Standard / I. Kim, J. Min, T. Lee, W. Han, J. Park // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1697–1706. DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2223011.

93. Krasnorutsky A. The Methods of Intellectual Processing of Video Frames in Coding Systems in Progress Aeromonitor to Increase Efficiency and Semantic Integrity / A. Krasnorutsky, R. Onyshchenko, D. Barannik, V. Barannik // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Kyiv, Ukraine, 15–17 Dec. 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 53–56. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024208.

94. Krasnorutsky A. Integration of Video Image Decryption Coding into a Remote Video Information Service / A. Krasnorutsky, K. Revva, V. Barannik, S. Shulgin, V. Kolesnyk, N. Kharchenko // 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2023). – Lviv : IEEE, 2023. – P. 1–6. DOI: 10.1109/AICT61584.2023.10452679.

95. Lainema J. Intra Coding of the HEVC Standard / J. Lainema, F. Bossen, W.-J. Han, J. Min, K. Ugur // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1792–1801. DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2221525.

96. Li F. Providing a Desired Compression Ratio for Better Portable Graphics Encoder of Color Images: Design and Analysis / F. Li, V. Lukin // Digitalization and Management Innovation : proceedings of DMI 2022. – [S.l.] : IOS Press, 2023. – P. 633–640. DOI: <https://doi.org/10.3233/FAIA230063>.

97. Li H. Secure Video Surveillance Framework in Smart City / H. Li [et al.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Art. no. 4419. DOI: 10.3390/s21134419.

98. Liang Z. Semantic Arithmetic Coding using Synonymous Mappings / Z. Liang, K. Niu, J. Xu, P. Zhang. – 2024. – (Preprint / arXiv:2401.14633). – URL: <https://arxiv.org/abs/2401.14633>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.14633>.
99. Liao S. Rate-Quality Based Rate Control Model for Neural Video Compression / S. Liao, C. Jia, H. Fan, J. Yan, S. Ma // ICASSP 2024 – 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) : proceedings (Seoul, Korea, 2024). – Seoul : IEEE, 2024. – P. 4215–4219. DOI: 10.1109/ICASSP48485.2024.10447777.
100. Liu C. Hardware Implementation of a High-Accuracy and High-Throughput Rate Estimation Unit for VVC Residual Coding / C. Liu [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2025. – Vol. 35, no. 3. – P. 2832–2843. DOI: 10.1109/TCSVT.2024.3487224.
101. Liu M. High-capacity reversible data hiding in encrypted images based on adaptive arithmetic coding and static Huffman coding / M. Liu, K. Wang, T. Gao // Cluster Computing. – 2023. – Vol. 26. – P. 3627–3645. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03748-3>.
102. Lu T. Compression Efficiency Improvement over HEVC Main 10 Profile for HDR and WCG Content / TT. Lu *et al.* // 2016 Data Compression Conference (DCC), Snowbird, UT, USA, 2016, pp. 279-288, doi: 10.1109/DCC.2016.99.
103. Ma C. Convolutional Neural Network-Based Arithmetic Coding for HEVC Intra-Predicted Residues / C. Ma, D. Liu, X. Peng [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2020. – Vol. 30, no. 7. – P. 1901–1916. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2019.2927027>.
104. Ma C. Convolutional Neural Network-Based Arithmetic Coding of DC Coefficients for HEVC Intra Coding / C. Ma, D. Liu, X. Peng, F. Wu // 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) : proceedings (Athens, Greece, 7–10 Oct. 2018). – Athens : IEEE, 2018. – P. 1772–1776. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIP.2018.8451166>.

105. Ma Z. Deep Lossless Compression Algorithm Based on Arithmetic Coding for Power Data / Z. Ma, H. Zhu, Z. He, Y. Lu, F. Song // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – Art. no. 5331. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145331>.
106. Marpe D. Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H.264/AVC Video Compression Standard / D. Marpe, H. Schwarz, T. Wiegand // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – 2003. – Vol. 13, No. 7. – P. 620–636. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.815173.
107. Min B. A Fast CU Size Decision Algorithm for the HEVC Intra Encoder/ B. Min and R. C. C. Cheung // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 892-896, May 2015, doi: 10.1109/TCSVT.2014.2363739.
108. Minopoulos G. QoE Assessment of Video Codecs for Video Streaming over 5G Networks / G. Minopoulos, K. E. Psannis, G. Kokkonis, Y. Ishibashi // 2020 3rd World Symposium on Communication Engineering (WSCE) : proceedings (Thessaloniki, Greece, 2020). – Thessaloniki : IEEE, 2020. – P. 34–38. DOI: 10.1109/WSCE51339.2020.9275576.
109. Naresh M. Deep reinforcement learning based QoE-aware actor-learner architectures for video streaming in IoT environments / M. Naresh, V. Das, P. Saxena [et al.] // *Computing*. – 2022. – Vol. 104. – P. 1527–1550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00607-021-01046-1>.
110. Nguyen T. Reduced-complexity entropy coding of transform coefficient levels using truncated golomb-rice codes in video compression / T. Nguyen, D. Marpe, H. Schwarz and T. Wiegand // *2011 18th IEEE International Conference on Image Processing*, Brussels, Belgium, 2011, pp. 753-756, doi: 10.1109/ICIP.2011.6116664.
111. Nightingale J. 5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks / J. Nightingale, P. Salva-Garcia, J. M. Alcaraz Calero, Q. Wang // *IEEE Transactions on Broadcasting*. – 2018. – Vol. 64, No. 2. – P. 621–634. DOI: 10.1109/TBC.2018.2816786.

112. Norkin A. HEVC Deblocking Filter / A. Norkin, G. Bjøntegaard, A. Fuldseth [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1746–1754. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2223053](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2223053).

113. Norkin A. In-Loop Filters in HEVC / A. Norkin, K. Andersson // In: Sze V. et al. (Eds.) High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. – Springer, 2014. – Ch. 7. DOI: [10.1007/978-3-319-06895-4_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06895-4_7).

114. Ohm J.-R. Comparison of the Coding Efficiency of Video Coding Standards — Including High Efficiency Video Coding (HEVC) / J.-R. Ohm, G. J. Sullivan, H. Schwarz, T. K. Tan, T. Wiegand // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1669–1684. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2221192](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2221192).

115. Onyshchenko R. Method of Coding Video Flow Segments Containing Motion Objects / R. Onyshchenko, V. Barannik, K. Revva, O. Kulitsa, P. Pertsev, M. Bielous // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 1–5. DOI: [10.1109/TCSET64720.2024.10755532](https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755532).

116. Onyshchenko R. Method for Encoding Transformed Video Segments in Truncated-Positional Space / R. Onyshchenko, K. Revva, V. Barannik, M. Babenko, D. Barannik, L. Chernysh // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 72–77. DOI: [10.1109/ATIT64324.2024.11222446](https://doi.org/10.1109/ATIT64324.2024.11222446).

117. Orduna M. Video Multimethod Assessment Fusion (VMAF) on 360VR contents / M. Orduna, C. Díaz, L. Muñoz [et al.]. – 2019. – (Preprint / arXiv:1901.06279). – URL: <https://arxiv.org/abs/1901.06279>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.06279>.

118. Partanen T. Motion-Vector-Driven Lightweight ROI Tracking for Real-Time Saliency-Guided Video Encoding / T. Partanen, M. Kotajärvi, A. Mercat, J.

Vanne // 2024 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO) : proceedings (Lyon, France, 26–30 Aug. 2024). – Lyon : IEEE, 2024. – P. 1675–1679. DOI: <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO63174.2024.10715465>.

119. Ponomarenko N. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives / N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev [et al.] // Signal Processing: Image Communication. – 2015. – Vol. 30. – P. 57–77. DOI: 10.1016/j.image.2014.10.009

120. Poynton C. Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces / C. Poynton. – 2nd ed. – Waltham, MA : Morgan Kaufmann, 2012. – 720 p. ISBN: 978-0-12-391926-7.

121. Prasad R. Human Bond Communication / R. Prasad // Wireless Personal Communications. – 2016. – Vol. 87, No. 3. – P. 619–627. DOI: 10.1007/s11277-015-2994-x.

122. Rappaport T. S. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! / T. S. Rappaport, Y. Sun, R. Mayzus [et al.] // IEEE Access. – 2013. – Vol. 1. – P. 335–349. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.

123. Razaq U. Evolution and Advancement of Arithmetic Coding over Four Decades / U. Razaq, X. Lizhong, C. Li, M. Usman // Open Journal of Science and Technology. – 2020. – № 3. – P. 194–236. DOI: <https://doi.org/10.31580/ojst.v3i3.1664>.

124. Said A. Arithmetic coding / A. Said, K. Sayood // [In:] Khalid Sayood (Ed.). Lossless Compression Handbook. – San Diego, CA : Academic Press, 2003. – P. 101–152.

125. Sayood K. Introduction to Data Compression / K. Sayood. – 5th ed. – Morgan Kaufmann, 2017. – 790 p. ISBN: 978-0-12-809474-7.

126. Schwarz H. Block Structures and Parallelism Features in HEVC / H. Schwarz, D. Marpe, T. Wiegand // In: Sze V. et al. (Eds.) High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. – Springer, 2014. – Ch. 3. DOI: 10.1007/978-3-319-06895-4_3.

127. Sesia S. LTE: The UMTS Long Term Evolution – From Theory to Practice / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker (Eds.). – 2nd ed. – Chichester : Wiley, 2011. – 792 p. ISBN: 978-0-470-66025-6.

128. Sharabayko M. P. Iterative Intra Prediction Search for H.265/HEVC / M. P. Sharabayko, N. G. Markov // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : proceedings. – Krasnoyarsk, 2013. DOI: [10.1109/SIBCON.2013.6693615](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693615).

129. Shen L. Adaptive Inter-Mode Decision for HEVC Jointly Utilizing Inter-Level and Spatiotemporal Correlations / L. Shen, Z. Zhang, Z. Liu // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2014. – Vol. 24, No. 10. – P. 1709–1722. DOI: [10.1109/TCSVT.2014.2313892](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2014.2313892).

130. Shen L. Fast CU Size Decision and Mode Decision Algorithm for HEVC Intra Coding / L. Shen, Z. Zhang, P. An // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2013. – Vol. 59, No. 1. – P. 207–213. DOI: [10.1109/TCE.2013.6490261](https://doi.org/10.1109/TCE.2013.6490261).

131. Sheng Q. A Chaos-Based Tunable Selective Encryption Algorithm for H.265/HEVC With Semantic Understanding / Q. Sheng, C. Fu, M. Tie [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2024. – Vol. 34, no. 11. – P. 11040–11055. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2024.3413770>.

132. Shi Y.-Q. Image and Video Compression for Multimedia Engineering / Y.-Q. Shi, H. Sun. – Boca Raton : CRC Press, 2000. – 360 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315097954>.

133. Slobodyanyuk O. Approach to Coding with Improved Integrity of Video Information for Transmission in Wireless Infocommunication Networks / O. Slobodyanyuk, A. Krasnorutsky [et al.] // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Kyiv, Ukraine, 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 38–42. DOI: [10.1109/ATIT58178.2022.10024245](https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024245).

134. Sole J. Transform Coefficient Coding in HEVC / J. Sole, R. Joshi, N. Nguyen [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1765–1777. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2223055](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2223055).

135. Sullivan G. J. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard / G. J. Sullivan, J.-R. Ohm, W.-J. Han, T. Wiegand // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1649–1668. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2221191](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2221191).

136. Sullivan G. J. Standardized Extensions of High Efficiency Video Coding (HEVC) / G. J. Sullivan, J. M. Boyce, Y. Chen [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2013. – Vol. 7, No. 6. – P. 1001–1016. DOI: [10.1109/JSTSP.2013.2283657](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2013.2283657).

137. Sze V. High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures / V. Sze, M. Budagavi, G. J. Sullivan (Eds.). – Springer International Publishing, 2014. – 375 p. ISBN: 978-3-319-06894-7. DOI: [10.1007/978-3-319-06895-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06895-4).

138. Sze V. Entropy Coding in HEVC / V. Sze, D. Marpe // In: Sze V. et al. (Eds.) High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. – Springer, 2014. – Ch. 9. DOI: [10.1007/978-3-319-06895-4_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06895-4_9).

139. Sze V. High Throughput CABAC Entropy Coding in HEVC / V. Sze, M. Budagavi // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22, No. 12. – P. 1778–1791. DOI: [10.1109/TCSVT.2012.2221526](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2221526).

140. Tan T. K. Video Quality Evaluation Methodology and Verification Testing of HEVC Compression Performance / T. K. Tan, R. Weerakkody, M. Mrak [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2016. – Vol. 26, No. 1. – P. 76–90. DOI: [10.1109/TCSVT.2015.2477916](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2477916).

141. Tang B. A Format Compliant Framework for HEVC Selective Encryption After Encoding / B. Tang, C. Yang, Y. Zhang // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2023. – Vol. 33, no. 3. – P. 1140–1156. DOI: [10.1109/TCSVT.2022.3212865](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2022.3212865).

142. Tech G. Overview of the Multiview and 3D Extensions of High Efficiency Video Coding / G. Tech, Y. Chen, K. Wegner [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2016. – Vol. 26, No. 1. – P. 35–49. DOI: 10.1109/TCSVT.2015.2477935.

143. Tsekhmystro R. Impact of distortions in UAV images on quality and accuracy of object localization / R. Tsekhmystro, O. Rubel, O. Prysiachniuk, V. Lukin // Radioelectronic and Computer Systems. – 2024. – № 4. – P. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.05>.

144. «Aerial View of Florence Cathedral Dome at Sunrise» [Електронні ресурси]. – Режим доступу: <https://www.pexels.com/video/aerial-view-of-florence-cathedral-dome-at-sunrise-36484575/> (дата звернення: 20.01.2026).

145. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. – New York : United Nations, 2019. – 126 p. Режим доступу: <https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Report.pdf> (дата звернення: 20.01.2025).

146. Upadhyay V. Optimized Arithmetic Coding for Efficient Data Compression in the Resource-Constrained Internet of Things (IoT) / V. Upadhyay, J. Kokila, A. Vaish. – 2025. – (Preprint / arXiv:2508.08840). – URL: <https://arxiv.org/abs/2508.08840>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.08840>.

147. Venkatateja J. Image Compression Based on DCT and Adaptive Grid Scanning / J. Venkatateja, R. Karsh // Proceedings of Second International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems (ICCCES 2020) / ed. by R. V. B. R. S. S. Prasad [et al.]. – Singapore : Springer, 2021. – P. 103–112. – (Lecture Notes in Electrical Engineering ; vol. 733). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0275-7_8.

148. Venkatesh V. Modified Arithmetic Coding to Increase the Compression Rate of Text Data / V. Venkatesh, K. Reddy, R. Anushiadevi [et al.] // IEEE International Conference on Contemporary Computing and Communications :

proceedings. – [S.l.] : IEEE, 2024. – P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/InC460750.2024.10649229>.

149. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard / G. K. Wallace // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 1992. – Vol. 38, No. 1. – P. xviii–xxxiv. DOI: 10.1109/30.125072.

150. Wang M. Low Complexity Quantization in High Efficiency Video Coding / M. Wang, X. Fang, S. Tan [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 145159–145170. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012145>.

151. Wang Y. Semantic Communication Empowered 6G Networks: Techniques, Applications, and Challenges / Y. Wang, H. Han, Y. Feng, J. Zheng, B. Zhang // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 28293–28314. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532797>.

152. Wang Z. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, No. 4. – P. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.

153. Wiegand T. Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard / T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjontegaard, A. Luthra // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2003. – Vol. 13, No. 7. – P. 560–576. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.815165.

154. Winkler S. Digital Video Quality: Vision Models and Metrics / S. Winkler. – Chichester : Wiley, 2005. – 222 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470024065>.

155. Xu J. Overview of the Emerging HEVC Screen Content Coding Extension / J. Xu, R. Joshi, R. A. Cohen // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2016. – Vol. 26, No. 1. – P. 50–62. DOI: 10.1109/TCSVT.2015.2478706.

156. Yan S. Improved Efficiency Adaptive Arithmetic Coding for GPU with Lower Shared Memory Usage / S. Yan, W. Tong // International Conference on

Frontiers Technology of Information and Computer : proceedings. – [S.l.] : IEEE, 2022. – P. 669–674. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICFTIC57696.2022.10075324>.

157. Yudin O. Platform Adaptive Integer AC Technology Combination / O. Yudin, K. Revva, H. Dmytro, R. Onyshchenko, I. Pantas, O. Mukoviz // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT): proceedings (Kyiv, Ukraine, 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 43–46. DOI: [10.1109/ATIT58178.2022.10024192](https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024192).

158. Zhang L. SR-SIM: a fast and high performance IQA index based on spectral residual / L. Zhang, H. Li // 19th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) : proceedings (Orlando, USA, 30 Sept.–3 Oct. 2012). – Orlando : IEEE, 2012. – P. 1473–1476.

159. Zhang R. Fast 3D-HEVC Inter Coding Using Data Mining and Machine Learning / R. Zhang, K. Jia, Y. Yu, P. Liu, Z. Sun // *IET Image Processing*. – 2022. – Vol. 16, No. 11. – P. 3067–3084. – DOI: [10.1049/ipr2.12539](https://doi.org/10.1049/ipr2.12539).

160. Zhang T. Fast Intra-Mode and CU Size Decision for HEVC / T. Zhang, M.-T. Sun, D. Zhao, W. Gao // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2017. – Vol. 27, No. 8. – P. 1714–1726. DOI: [10.1109/TCSVT.2016.2556518](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2016.2556518).

161. Zhao Z. Discrete Cosine Transform-Based Joint Spectral–Spatial Information Compression and Band-Correlation Calculation for Hyperspectral Feature Extraction / Z. Zhao, C. Yang, Z. Qiu, Q. Wu // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16, No. 22. – Art. no. 4270. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16224270>.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті в журналах Scopus/Web of Science:

1. Бараннік В. В. Технологія ковзного кодування нерівномірних діагональних послідовностей в двовимірному спектральному просторі трансформанти / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Ю. М. Бабенко, Р. С. Онищенко, Т. В. Белікова, О. О. Ігнат'єв // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia*. – 2023. – № 94. – С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.94.13-23>.

Статті в журналах категорії Б:

2. Бараннік В. В. Метод усічено-позиційного декодування трансформант за нерівномірно-діагональним форматом / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Д. В. Бараннік, Р. С. Онищенко // *Наукоємні технології*. – 2023. – № 3. – С. 280–288. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17949>.

3. Бараннік В. В. Метод формування інформативно-позиційної ваги для усічено-позиційної кодової системи представлення трансформованих відеосегментів / В. В. Бараннік, К. В. Ревва, С. С. Шульгін, Р. С. Онищенко, О. О. Ігнат'єв // *Наукоємні технології*. – 2023. – № 2. – С. 156–163. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.58.17652>.

4. Ревва К.В. Метод відновлення в системах стиснення для забезпечення цілісності відеоданих / К. В. Ревва, В. В. Бараннік // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Т. 36 (75), № 6, ч. 1. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/07>.

5. Ревва К.В. Метод декодування компонент трансформант за діагонально-локаційним форматом / К. В. Ревва, В. В. Бараннік // *Наукоємні технології*. – 2025. – Вип. 68, № 4. – С. 479. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.19047>.

6. Ревва К.В. Метод оцінювання ефективності усічено-позиційного кодування для інфокомунікаційних систем / К. В. Ревва, В. В. Бараннік, Д. В. Бараннік, Р. С. Онищенко, М. В. Бабенко // Наукоємні технології. – 2024. – № 2. – С. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18711>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Тези в журналах (Scopus):

7. K. Revva, Yudin O. Platform Adaptive Integer AC Technology Combination / O. Yudin, H. Dmytro, R. Onyshchenko, I. Pantas, O. Mukoviz // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Kyiv, Ukraine, 2022). – Kyiv : IEEE, 2022. – P. 43–46. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024192. **Scopus**

8. Revva K. Integration of Video Image Decryption Coding into a Remote Video Information Service / K. Revva, V. Barannik, A. Krasnorutsky, S. Shulgin, V. Kolesnyk, N. Kharchenko // 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2023). – Lviv : IEEE, 2023. – P. 1–6. DOI: 10.1109/AICT61584.2023.10452679. **Scopus**

9. Barannik V. Method of Integrating Infocommunication Technology for Encoding Video Segments into Standardized Platforms / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, M. Babenko, O. Shaigas, G. Pris // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 42–47. DOI: 10.1109/TCSET64720.2024.10755845. **Scopus**

10. Revva K. Method of Coding Video Flow Segments Containing Motion Objects / K. Revva, R. Onyshchenko, V. Barannik, O. Kulitsa, P. Pertsev, M. Bielous // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TCSET64720.2024.10755532. **Scopus**

11. Barannik V. Model Functional Transformations for Formation Syntactic Description Diagonals Transformer / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, Y. Babenko, M. Komarov, O. Matviichuk-Yudina // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 65–71. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222435. **Scopus**

12. Revva K. Method for Encoding Transformed Video Segments in Truncated-Positional Space / K. Revva, R. Onyshchenko, V. Barannik, M. Babenko, D. Barannik, L. Chernysh // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 72–77. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222446. **Scopus**

13. Barannik V. Technique for encoding clustered transformants in differentially-normalized space / V. Barannik, K. Revva, E. Eliseev, M. Babenko, O. Yudin, O. Yudin, Y. Tsimura // CH&CMiGIN'25: Fourth International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Kyiv, Ukraine, 20–22 June 2025). – URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4024/short08.pdf>. **Scopus**

14. Barannik V. Method for Creating the Concept of Compression Encoding Transformed Segments / V. Barannik, K. Revva, R. Onyshchenko, M. Babenko, P. Pertsev, S. Fediuk // 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) : proceedings (Lviv, Ukraine, 2024). – Lviv : IEEE, 2024. – P. 112–118. DOI: 10.1109/ATIT64324.2024.11222418. **Scopus**

Додаток Б

Приклади відновлених відеокадрів у складі групи з використанням методів кодування прогнозно-залишкових блоків



Рисунок Б.1.1. – Відновлений перший (базовий) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу САВАС



Рисунок Б.1.2. – Відновлений перший (базовий) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.2.1. – Відновлений другий (передбачений) відеокадр
«Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення
цілісності на рівні $loss=II$ з використанням методу САВАС



Рисунок Б.2.2. – Відновлений другий (передбачений) відеокадр
«Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення
цілісності на рівні $loss=II$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.3.1. – Відновлений третій (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SAVAS



Рисунок Б.3.2. – Відновлений третій (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.4.1. – Відновлений четвертий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу САВАС



Рисунок Б.4.2. – Відновлений четвертий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.5.1. – Відновлений п'ятий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SAVAS



Рисунок Б.5.2. – Відновлений п'ятий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.6.1. – Відновлений шостий (передбачений) відеокадр
«Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення
цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу САВАС



Рисунок Б.6.2. – Відновлений шостий (передбачений) відеокадр
«Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення
цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.7.1. – Відновлений сьомий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу САВАС



Рисунок Б.7.2. – Відновлений сьомий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $\text{loss}=\Pi$ з використанням методу SBPC



Рисунок Б.8.1. – Відновлений восьмий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $loss=II$ з використанням методу SABAS



Рисунок Б.8.2. – Відновлений восьмий (передбачений) відеокадр «Флорентійський собор, (Флоренція, Італія)» в режимі забезпечення цілісності на рівні $loss=II$ з використанням методу SBPC

Додаток В

Акти реалізації результатів науково-прикладних досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ГО «ІНСТИТУТ ДЕФЕНС»

Дмитро ПОЛІН

«_____» _____ 2025 р.



А К Т

впровадження результатів науково-прикладних досліджень

Ревви Кирила Віталійовича

Комісія у складі: голови начальника конструкторського відділу - керівника конструкторської групи Кукобко Сергія, членів Купрія Олександра, Кравідза Романа склала дійсний акт. Він стосується використання в підсистемах обробки та передачі інформації результатів науково-прикладних досліджень Ревви Кирила Віталійовича, а саме:

- методу переформатування координат компонент трансформант за нерівномірним діагональним напрямком в двовимірному спектральному просторі;
- методу кодування трансформованих відеосегментів в нерівномірно-діагональному просторі на основі усічено-позиційного перетворення;
- технології обробки відеокadrів з потрібним рівнем цілісності на основі скорочення структурно-комбінаторної надмірності в нерівномірно-діагональному спектральному просторі;
- технології інтегрування створеної технологічної концепції до стандартизованих платформ щодо обробки та передачі кодованих відеокadrів.

Впровадження на дослідних макетах підсистем обробки та передачі інформації отриманих Реввою Кирилом Віталійовичем наукових результатів дозволило забезпечити наступну перевагу відносно стандартизованих технологій:

- збільшення рівня стиснення відеокадрів з різним рівнем структурно-семантичної та статистичної надмірності в середньому на 21 %. При цьому забезпечується рівень достовірності не менш ніж 30 дБ;

- забезпечення передачі в реальному часі відеокадрів зі збільшенням їх повноти, тобто рівня їх деталізуючої спроможності в середньому на 43 %.

Голова комісії

Члени комісії:



Кукобко Сергій

Кравідз Роман

Купрій Олександр

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. головного інженера

ІОВ "Одеський авіаційний завод"

Микола ГОНЧАРЕНКО

10 2025 року



А К Т

впровадження результатів науково-прикладних досліджень
Ревви Кирила Віталійовича

Комісія у складі: В.о. головного технолога Олега Маревського, провідного інженера технолога Юрія Ведмідя, провідного інженера Анатолія Якимчука склала дійсний акт, який полягає в тому, що при виконанні дослідно-конструкторських робіт використані наступні результати науково-прикладних досліджень Ревви Кирила Віталійовича:

Метод кодування та відновлення нерівномірних діагональних послідовностей в просторі трансформанти. Метод базується на :

1.1. Моделі встановлення ваги для елементів позиційних чисел спектра трансформанти.

1.2. Використанні функціоналу щодо визначення співвідношення між сусідніми елементами усічено-позиційних чисел спектрального простору.

Впровадження результатів досліджень Ревви Кирила Віталійовича в автоматизованій системі відображення інформації на основі програмно-апаратних реалізацій дозволило забезпечити:

1) для пікового відношення сигнал/шум 13 дБ:

- коефіцієнт компресії зображень, який приймає в середньому наступні значення: 6,8 разів – для насичених зображень; від 12 до 25 для зображень з середнім рівнем насиченості;

- досягається перевага за коефіцієнтом компресії щодо існуючих методів на рівні від 10 до 15%.

Голова комісії

Члени комісії:

Олег МАРЕВСЬКИЙ

Юрій ВЕДМІДЬ

Анатолій ЯКИМЧУК