МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Туленко Ігор Михайлович

УДК: 621.391:004.942

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ФОРМУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність 172 –Електронні комунікації та радіотехніка
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник:
Індик Сергій Володимирович,
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Туленко І.М. Методи керування процесами формування та оптимізації ансамблів складних сигналів в телекомунікаційних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 172 – Електронні комунікації та радіотехніка. – Український державний університет залізничного транспорту, Україна, Харків, 2026.

В дисертаційній роботі вирішується актуальне науково-технічне завдання підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем шляхом розробки методів формування, ентропійної оцінки та багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів, що забезпечує зменшення інтерференції, підвищення роздільності сигналів та збільшення пропускної здатності систем у складному завадовому середовищі.

Об’єктом дослідження є процеси формування та багатокритеріальної оптимізації ансамблів сигналів з урахуванням їх структурних властивостей у телекомунікаційних системах.

Предметом дослідження є методи та алгоритми формування, ентропійної оцінки та оптимізації ансамблів складних сигналів, а також їх кореляційні та структурні властивості.

Метою дисертаційного дослідження є розробка методів і моделей формування та оптимізації ансамблів складних сигналів на основі їх структурної організації та ентропійних критеріїв для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем.

У вступі обґрунтовано актуальність підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем. Представлено наукову новизну, що полягає в розробці методів формування, ентропійної оцінки та багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів. Обґрунтовано практичне значення отриманих результатів, яке полягає у зменшенні інтерференції, підвищенні роздільності сигналів та збільшенні пропускної здатності систем. Наведено особистий внесок здобувача та перелік наукових публікацій за темою дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних підходів до формування та оцінювання ансамблів складних сигналів у телекомунікаційних системах. Розглянуто сучасні методи формування сигналів та критерії оцінювання їх кореляційних та структурних характеристик. Виявлено обмеження існуючих підходів, що обґрунтовують необхідність розробки нових методів формування та оптимізації ансамблів сигналів в умовах складного завадового середовища.

У **другому розділі** розроблено метод формування ансамблів складних сигналів у часовій області, що передбачає декомпозицію сигналу на часові інтервали та їх впорядкування з використанням параметризованих ЛПτ-перестановок. Це дозволяє керовано змінювати структуру сигналу та формувати ансамблі з заданими кореляційними властивостями. Розроблено математичну модель та алгоритм реалізації методу, визначено критерії оцінювання ефективності та виконано порівняльний аналіз з існуючими підходами. В результаті експериментального моделювання отримано зниження рівня взаємної кореляції сигналів ансамблю та підвищення завадостійкості, що обґрунтовує ефективність запропонованого методу.

У **третьому розділі** розроблено ентропійно-орієнтований метод оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів в умовах завад. Запропоновано інтегральний ентропійний критерій, який об’єднує перестановочну, вибіркову, нечітку ентропії та ентропію розсіювання, що дозволяє оцінювати структурну стійкість ансамблю та визначати оптимальні параметри його організації. Розроблено математичну модель та алгоритм реалізації методу, виконано експериментальну верифікацію та порівняльний аналіз. Результати моделювання підтвердили зниження ентропійних показників та підвищення стійкості структурних характеристик ансамблів складних сигналів до впливу завад.

У **четвертому розділі** розроблено метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів на основі модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D, у якому механізми еволюційного пошуку поєднуються з моделями перестановок часових сегментів та ентропійними показниками для оцінювання структури ансамблю. Метод передбачає декомпозицію багатокритеріальної задачі на підзадачі, оцінювання ансамблів за сукупністю кореляційних, енергетичних та

ентропійних критеріїв, а також формування множини Парето-оптимальних рішень. Розроблено алгоритм реалізації методу та проведено експериментальне моделювання. За результатами моделювання обґрунтовано можливість багатокритеріального узгодження кореляційних, енергетичних та ентропійних характеристик ансамблів складних сигналів.

У **висновках** узагальнено результати дисертаційного дослідження, які спрямовані на вирішення поставленого науково-технічного завдання та розв'язання визначених часткових задач.

За результатами проведеного дисертаційного дослідження було сформульовано наступні **наукові результати**:

1. **Удосконалено** метод формування ансамблів складних сигналів за рахунок застосування ЛПτ-послідовностей для формування індексної перестановки часових інтервалів, що, на відміну від існуючих підходів, забезпечує керовану варіативність ансамблю, рівномірне покриття простору перестановок та зниження взаємної кореляції сигналів при підвищенні масштабованості ансамблю в межах заданих кореляційних обмежень.

2. **Удосконалено** ентропійно-орієнтований метод оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів шляхом введення єдиного інтегрального критерію, який поєднує показники перестановочної, вибіркової та нечіткої ентропії і, на відміну від існуючих підходів, забезпечує кількісну оцінку структурної стійкості ансамблів та дозволяє виявляти оптимальні параметри їх часової організації в умовах завад.

3. **Удосконалено** метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів у часовій області на основі модифікованого алгоритму MOEA/D, який, на відміну від відомих підходів, враховує ЛПτ-перестановки часових сегментів та ентропійні характеристики структури сигналів, що забезпечує узгодження процесу еволюційної оптимізації та підвищення структурної стійкості ансамблів.

Практичні результати, отримані в дисертації, полягають у розробці алгоритмів, моделей, програмних реалізацій з формування, ентропійної оцінки

та оптимізації ансамблів складних сигналів, які сприяють підвищенню завадостійкості телекомунікаційних систем, а саме:

– на основі порівняльного аналізу сучасних методів формування та оптимізації ансамблів складних сигналів, а також критеріїв оцінювання їх кореляційних властивостей обґрунтовано доцільність розробки нових методів і алгоритмів формування ансамблів сигналів та удосконалення підходів до оцінювання їх кореляційних та структурних характеристик;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу формування ансамблів сигналів у часовій області на основі ЛПτ-перестановок, застосування якого забезпечує зниження пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції на 51,2–82,1 % порівняно з багатофазними послідовностями Франка (S_{Frank}) та на 12,3–27,4 % порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією ($S_{h\text{-}energy}$) для довжин послідовностей P = 40–513, що в результаті сприяє зменшенню міжканальної інтерференції в системах множинного доступу;

– реалізовано механізм кореляційно-критеріального відбору сигнальних реалізацій на основі ґраткових ЛПτ-перестановок, який забезпечує формування ансамблів сигналів з обсягом, що перевищує класичні підходи в 10^6–10^{20} разів, а порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією ($S_{h\text{-}energy}$) дає приріст 3,8–9,6 % у діапазоні довжин P = 40–9000, що сприяє підвищенню ефективності розділення сигналів та зниженню взаємних завад;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію інтегрального ентропійного методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів сигналів, який базується на аналізі перестановочної, ентропії вибірки, нечіткої ентропії та ентропії розсіювання і забезпечує зниження ентропійної складності сигналів на 12,0–35,0 % в залежності від масштабу аналізу та рівня SNR, підвищуючи структурну впорядкованість і кореляційну стабільність сигналів;

– реалізовано механізм вибору оптимального параметра часової організації ансамблю на основі мінімізації інтегрального ентропійного критерію $K(\tau)$, застосування якого забезпечує зниження ймовірності помилки

виявлення сигналу до 41,7 % при P = 257, SNR = 0 dB та до 37,9 % при P = 513, SNR = –5 dB в порівнянні з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією ($S_{h\text{-}energy}$), що забезпечує підвищення достовірності виявлення сигналів в умовах низьких значень SNR;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів сигналів на основі модифікованого еволюційного алгоритму E-LPT-MOEA/D, що поєднує ЛПτ-перестановки часових сегментів з декомпозиційним принципом оптимізації та забезпечує збільшення гіпероб'єму фронту Парето на 30,6 % порівняно з методом ЛПτ - перестановок і на 12,5 % порівняно з класичним алгоритмом MOEA/D, що дозволяє формувати більш збалансовані конфігурації сигнальних ансамблів;

– реалізовано модифікований алгоритм еволюційної оптимізації з ентропійно-орієнтованим керуванням процесом пошуку, що передбачає регулювання вагових коефіцієнтів і інтенсивності мутації та забезпечує прискорення збіжності алгоритму на 30,77 % відносно MOEA/D і на 47,06 % відносно ЛП-τ, що дозволяє швидше формувати ансамблі сигналів із заданими кореляційними характеристиками та підвищувати завадостійкість когнітивних телекомунікаційних систем.

Отримані результати підтверджують теоретичну і прикладну цінність розроблених методів формування, ентропійної оцінки та оптимізації ансамблів сигналів у задачах підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем.

Ключові слова: когнітивні телекомунікаційні системи, завадостійкість, стандарт IEEE, канали радіозв'язку, ансамбль складних сигналів, багатокритеріальна оптимізація, безпроводові мережі, SNR (сигнал/шум), структурна впорядкованість, зона обслуговування, еволюційний алгоритм MOEA/D, декомпозиція, кореляційні характеристики, взаємна кореляція, Паретто-фронт, часово-частотна область, ентропія, спектр, перестановка сегментів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Bondar, A. V., Shumilin, H. O., Ahamova, R. H., Tulenko, I. M. (2023). Planning of experimental research in the formation of reinforcing protective coatings. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації, 19(26). https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-23 *(особистий внесок: Туленко І.М. – математична модель; Bondar A.V. – запропонований метод дослідження; Shumilin H.O. – експериментальні дослідження; Ahamova R.H. – програмна реалізація та підготовка публікації).*

2. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Tulenko, I.,Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., & Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2*(4 (134), 23–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102. **(Scopus).** (*особистий внесок: Mahdi Q.A. – запропонований метод, координація роботи групи; Туленко І.М. – математична модель; Shyshatskyi A. – постановка задачі; Voznytsia A., Plekhova G. – програмна реалізація; Shostak S., Semko R., Zheliezniak D., Momit A., Sova M. – експериментальне моделювання*);

3. Tulenko I., Shevchenko O. (2025) Entropy-based evaluation method of signal ensembles using LPT-τ permutations and Markov models// *Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering*/Lutsk National Technical University. – Lutsk. – 2025. (№61), P.P.300-310, https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-39. (*особистий внесок: Туленко І.М. – метод на основі LPT-τ-перестановок; Шевченко О.О. – метод на основі марківської моделі*).

4. Tulenko I. M., Komar O.M. (2025) Time-domain formation of signal ensembles using LPT-τ-sequences. – National Aviation University. Science-intensive Technologies. Series: «Electronics, telecommunications and radio engineering»,

Kyiv, 2025. Vol. 68, № 4, PP. 543-552, https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20739 (*особистий внесок: Туленко І.М. – метод формування ансамблів сигналів на основі LPT-τ-послідовностей, Комар О.М. – аналіз результатів та підготовка публікації).*

5. Tulenko I. M., Indyk S.V. Method for Multi-Objective Optimization of Complex Signal Ensembles Based on the Evolutionary Algorithm E-LPT-MOEA/D// SISIOT (Security of Infocommunication Systems and Internet of Things), Vol.3, No.2 (Dec.2025), P. 02014//Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych. https://doi.org/10.31861/sisiot2025.2.02014. (*особистий внесок: Туленко І.М. – метод багатокритеріальної оптимізації E-LPT-MOEA/D та математична модель; Індик С.В. – наукове консультування, аналіз результатів*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Туленко І.М., Індик С.В., Свищов М.Ю. Удосконалення методу формування ансамблів складних сигналів у часовій області за рахунок LPT-τ – послідовностей// *Тези доповіді за матеріалами 38 Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті». 9-10 жовтня 2025 року.* – С. 85 *(форма участі – секційна доповідь); (особистий внесок: Туленко І.М. Удосконалений метод формування ансамблів сигналів; Індик С.В. – аналіз результатів; Свищов М.Ю. – програмна реалізація).*

7. Tulenko I., Shevchenko O. Method for integrated assessment of structural stability of complex signal ensembles using entropy-based analysis//Innovative Research in Science and Economy: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. Brussels, Belgium. April 1-3, 2026., SECTION: TECHNICAL SCIENCES, P.P. 368-371, *(форма участі – публікація тез доповіді); (особистий внесок: Туленко І.М. – метода та модель: Шевченко О.О. – програмна реалізація).*

8. Tulenko I., Indyk S. Method for entropy-weighted updating of weighting coefficients in a genetic algorithm for optimization of complex signal ensembles in cognitive telecommunication systems// Application of Information Technologies in Training and Operations of Security and Defense Forces: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (March 17, 2026, Kharkiv, Ukraine). – Kharkiv: Nat. Acad. of the Nat. Guard of Ukraine, 2026, p.371-372, *(форма участі – публікація тез доповіді): (особистий внесок: Туленко І.М. – ентропійно-зваженого коригування коефіцієнтів генетичного алгоритму; Індик С.В. – наукове консультування).*

9. Tulenko I., Indyk S. Entropy-based evaluation method of signal ensembles using permutations //XXII міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: тези доповідей, 08 – 09 квітня 2026 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2026, с. 420, *(форма участі: секційна доповідь); (особистий внесок: метод ентропійного оцінювання ансамблів сигналів; Індик С. – аналіз результатів та підготовка публікації).*

10. Туленко І.М, Індик С.В. Формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем в умовах завадового середовища // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів 14-15 травня 2026). Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Issue 31 P.568, *(форма участі – публікація тез доповіді): (особистий внесок: метод формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем; Індик С.В. – аналіз результатів та наукове консультування).*

ABSTRACT

Tulenko I. M. Methods for Managing the Processes of Formation and Optimization of Complex Signal Ensembles in Telecommunication Systems. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining a scientific doctor of philosophy (PhD) in specialty 172 – Electronic Communications and Radio Engineering. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation addresses a relevant scientific and technical problem of improving the interference immunity of telecommunication systems through the development of methods for the formation, entropy-based evaluation, and multi-objective optimization of complex signal ensembles. The proposed approach ensures a reduction in interference, improved signal separation, and increased system capacity under challenging interference conditions.

Object of the research is the processes of formation and multi-objective optimization of signal ensembles, taking into account their structural properties in telecommunication systems.

Subject of the research is methods and algorithms for the formation, entropy-based evaluation, and optimization of complex signal ensembles, as well as their correlation and structural properties that determine the efficiency of telecommunication systems.

The aim of the dissertation is to develop methods and models for the formation and optimization of complex signal ensembles based on their structural organization and entropy-based criteria.

In the introduction, the importance of improving the interference immunity of telecommunication systems is substantiated. The scientific novelty is presented, which consists in the development of methods for the formation, entropy-based evaluation, and multi-objective optimization of complex signal ensembles. The practical significance of the obtained results is justified and lies in reducing interference, improving signal distinguishability, and increasing system capacity. The

author's personal contribution and the list of scientific publications related to the dissertation topic are also presented.

The first chapter is devoted to the analysis of modern approaches to the formation and evaluation of complex signal ensembles in telecommunication systems. It reviews contemporary methods of signal formation and criteria for assessing their correlation and structural characteristics. The limitations of existing approaches are identified, thereby substantiating the need for the development of new methods for the formation and optimization of signal ensembles under adverse interference conditions.

The second chapter, a method for the formation of complex signal ensembles in the time domain is developed, which involves decomposing a signal into time intervals and arranging them using parameterized LPT-τ permutations. This approach enables controlled modification of the signal structure and the formation of ensembles with specified correlation properties. A mathematical model and an algorithm for implementing the method are developed, evaluation criteria are defined, and a comparative analysis with existing approaches is conducted. The results of experimental modeling demonstrate a reduction in cross-correlation levels within the ensemble and improved interference immunity, thereby confirming the effectiveness of the proposed method.

The third chapter, an entropy-oriented method for assessing the structural organization of complex signal ensembles under interference conditions is developed. An integral entropy-based criterion is proposed, combining permutation, sample, fuzzy, and dispersion entropy, which makes it possible to evaluate the structural stability of the ensemble and determine the optimal parameters of its organization. A mathematical model and an implementation algorithm of the method are developed, and experimental verification and comparative analysis are carried out. The simulation results confirm a reduction in entropy measures and an increase in the stability of structural characteristics of complex signal ensembles under interference.

The fourth chapter a method for multi-objective optimization of complex signal ensembles based on a modified evolutionary algorithm MOEA/D is developed,

in which evolutionary search mechanisms are combined with models of time-segment permutations and entropy-based indicators for assessing the ensemble structure. The method involves decomposing the multi-objective problem into subproblems, evaluating ensembles using a set of correlation, energy, and entropy criteria, and forming a set of Pareto-optimal solutions. An implementation algorithm of the method is developed, and experimental modeling is carried out. The simulation results substantiate the possibility of multi-objective coordination of correlation, energy, and entropy characteristics of complex signal ensembles.

In the conclusions, the results of the dissertation research are summarized, aimed at solving the stated scientific and technical problem and addressing the defined partial tasks.

Based on the results of the conducted dissertation research, the following **scientific results** have been formulated:

1. The method for forming ensembles of complex signals has been improved through the use of LPτ-sequences for generating index permutations of time intervals, which, in contrast to existing approaches, ensures controlled variability of the ensemble, uniform coverage of the permutation space, and a reduction in mutual correlation of signals while increasing the scalability of the ensemble within specified correlation constraints.

2. The entropy-oriented method for assessing the structural organization of complex signal ensembles has been improved by introducing a unified integral criterion that combines permutation, sample, and fuzzy entropy measures and, in contrast to existing approaches, provides a quantitative assessment of the structural stability of ensembles and enables the identification of optimal parameters of their time-domain organization under interference conditions.

3. The method for multi-objective optimization of complex signal ensembles in the time domain has been improved based on a modified MOEA/D algorithm which, unlike existing approaches, takes into account LPT-τ permutations of time segments and entropy-based structural characteristics of signals, thereby ensuring the

coordination of the evolutionary optimization process and improving the structural stability of ensembles.

The practical results obtained in the dissertation consist in the development of algorithms, models, and software implementations for the formation, entropy-based evaluation, and optimization of complex signal ensembles, which contribute to improving the interference immunity of telecommunication systems, namely:

– based on a comparative analysis of modern methods for the formation and optimization of complex signal ensembles, as well as criteria for evaluating their correlation properties, the feasibility of developing new methods and algorithms for ensemble formation and improving approaches to the assessment of their correlation and structural characteristics has been substantiated;

– an algorithm and software implementation of the method for forming signal ensembles in the time domain based on LPτ-permutations have been developed, the application of which ensures a reduction in the peak sidelobe level of the autocorrelation function by 51,2–82,1% compared to Frank polyphase sequences (S_{Frank}) and by 12,3–27,4% compared to the time permutation method with energy optimization ($S_{h\text{-}energy}$) for sequence lengths P = 40–513, which ultimately contributes to reducing inter-channel interference in multiple access systems;

– a correlation-criterion-based selection mechanism for signal realizations based on lattice LPτ-permutations has been implemented, which ensures the formation of signal ensembles with a size exceeding classical approaches by 10^6–10^{20} times, and, compared to the time permutation method with energy optimization ($S_{h\text{-}energy}$), provides an improvement of 3,8–9,6% in the range of sequence lengths P=40–9000, thereby enhancing signal separation efficiency and reducing mutual interference;

– an algorithm and software implementation of an integral entropy-based method for assessing the structural organization of signal ensembles have been developed, based on the analysis of permutation entropy, sample entropy, fuzzy entropy, and dispersion entropy, which ensures a reduction in the entropy complexity

of signals by 12,0–35,0% depending on the analysis scale and SNR level, thereby improving structural organization and correlation stability of signals;

– a mechanism for selecting the optimal parameter of the time-domain organization of the ensemble based on minimizing the integral entropy criterion $K(\tau)$ has been implemented, the application of which ensures a reduction in the signal detection error probability by up to 41,7% at P = 257, SNR=0 dB and by up to 37,9% at P=513, SNR = − 5 dB compared to the time permutation method with energy optimization ($S_{h\text{-}energy}$), thereby improving the reliability of signal detection under low SNR conditions;

– an algorithm and software implementation of a method for multi-objective optimization of signal ensembles based on the modified evolutionary algorithm E-LPT-MOEA/D have been developed, which combines LPT-τ permutations of time segments with the decomposition-based optimization principle and ensures an increase in the Pareto front hyper volume by 30,6% compared to the LPT-τ permutation method and by 12.5% compared to the classical MOEA/D algorithm, enabling the formation of more balanced configurations of signal ensembles;

– a modified evolutionary optimization algorithm with entropy-oriented control of the search process has been implemented, which involves the adjustment of weighting coefficients and mutation intensity and ensures acceleration of convergence by 30,77% relative to MOEA/D and by 47,06% relative to LPT-τ, allowing faster formation of signal ensembles with specified correlation characteristics and improving the interference immunity.

The results confirm the theoretical and practical value of the proposed methods for improving the interference immunity of telecommunication systems.

Keywords: cognitive telecommunication systems, interference immunity, IEEE standard, radio communication channels, complex signal ensemble, multi-objective optimization, wireless networks, SNR (signal-to-noise ratio), structural organization, coverage area, evolutionary algorithm MOEA/D, decomposition, correlation characteristics, mutual correlation, Pareto front, time-frequency domain, entropy, spectrum, segment permutation.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results were published:

1. Bondar, A. V., Shumilin, H. O., Ahamova, R. H., Tulenko, I. M. (2023). Planning of experimental research in the formation of reinforcing protective coatings. Proceedings of the State Research Institute of Aviation, 19(26). https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-23.

2. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Tulenko, I.,Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., & Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in organizational and technical systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(4 (134), 23–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102. **(Scopus).**

3. Tulenko I., Shevchenko O. (2025) Entropy-based evaluation method of signal ensembles using LPT-τ permutations and Markov models// Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering/Lutsk National Technical University. – Lutsk. – 2025. (№61), P.P.300-310, https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-39.

4. Tulenko I. M., Komar O.M. (2025) Time-domain formation of signal ensembles using LPT-τ-sequences. – National Aviation University. Science-intensive Technologies. Series: «Electronics, telecommunications and radio engineering», Kyiv, 2025. Vol. 68, № 4, PP. 543-552, https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20739.

5. Tulenko I. M., Indyk S.V.(2025) Method for Multi-Objective Optimization of Complex Signal Ensembles Based on the Evolutionary Algorithm E-LPT-MOEA/D// SISIOT (Security of Infocommunication Systems and Internet of Things), Vol.3, No.2 (Dec.2025), P. 02014//Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych. https://doi.org/10.31861/sisiot2025.2.02014.

Published works of an approbation nature:

6. Tulenko I.M., Indyk S.V., Svyshchov M.Y. Improvement of the method for forming ensembles of complex signals in the time domain based on LPT-τ sequences //Proceedings of the 38th International Scientific and Practical Conference «Information and Control Systems in Railway Transport». October 9–10, 2025. – P. 85.

7. Tulenko I., Shevchenko O. Method for integrated assessment of structural stability of complex signal ensembles using entropy-based analysis//Innovative Research in Science and Economy: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. Brussels, Belgium. April 1-3, 2026., SECTION: TECHNICAL SCIENCES, P.P. 368-371.

8. Tulenko I., Indyk S. Method for entropy-weighted updating of weighting coefficients in a genetic algorithm for optimization of complex signal ensembles in cognitive telecommunication systems// Application of Information Technologies in Training and Operations of Security and Defense Forces: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (March 17, 2026, Kharkiv, Ukraine). – Kharkiv: Nat. Acad. of the Nat. Guard of Ukraine, 2026, p.371-372.

9. Tulenko I., Indyk S. Entropy-based evaluation method of signal ensembles using permutations // Proceedings of the 22nd International Scientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University “Advanced Technologies for Airspace Protection”. April 8–9, 2026. – Kharkiv.– P. 420.

10. Tulenko I.M., Indyk S.V. Formation of complex signal ensembles for cognitive telecommunication systems under interference conditions // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Prospects for the Development of Weapons and Military Equipment of the Land Forces». May 14–15, 2026. – Lviv: Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, 2026.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 20
ВСТУП 21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ 29
1.1 Аналіз сучасних методів формування ансамблів складних сигналів 29
1.2 Обґрунтування вибору методу формування ансамблів сигналів 33
1.3 Аналіз методів багатокритеріальної оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів 37
1.4 Обґрунтування задачі дослідження з формування та оптимізації ансамблів сигналів з керованими кореляційними характеристиками 42
Висновки за розділом 1 44
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ ЛПτ-ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ДЛЯ КЕРОВАНОГО ЗНИЖЕННЯ ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ 46
2.1 Обґрунтування використання ЛПτ-послідовностей для перестановки інтервалів у часовій області при формуванні ансамблів сигналів 47
2.2 Розробка методу параметризованих ЛПτ-перестановок часових інтервалів з кореляційною оптимізацією 54
2.3 Алгоритм реалізації методу параметризованих ЛПτ-перестановок 59
2.4 Експериментальна оцінка кореляційної ефективності методу ЛПτ-перестановок 63
Висновки до розділу 2 74
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕНТРОПІЙНО-ОРІЄНТОВАНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ ВПОРЯДКОВАНОСТІ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ЗАВАД 76

3.1 Обґрунтування застосування ентропійних методів оцінки структурної стійкості ансамблів сигналів у когнітивному радіосередовищі 77
3.2 Розробка інтегрального ентропійного методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів та алгоритму його реалізації 83
3.3 Експериментальна верифікація інтегрального ентропійного критерію структурної впорядкованості ансамблів сигналів 90
3.4 Порівняльна оцінка завадостійкості ансамблів складних сигналів за довірчими інтервалами 95
Висновки за розділом 3 101
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНОГО ПІДХОДУ 103
4.1 Обґрунтування застосування еволюційного підходу до багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів 104
4.2 Розробка методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів та алгоритму його реалізації 108
4.3 Експериментальна оцінка ефективності методу оптимізації ансамблів складних сигналів на основі модифікованого алгоритму MOEA/D 117
Висновки за розділом 4 126
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 131
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ 149
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ 152
ДОДАТОК В. ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЗОВАНИХ ЛПТ- 154

ПЕРЕСТАНОВОК ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ З КОРЕЛЯЦІЙНОЮ ОПТИМІЗАЦІЄЮ

ДОДАТОК Г. ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ ЕНТРОПІЙНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ ВПОРЯДКОВАНОСТІ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ 157

ДОДАТОК Д ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО АЛГОРИТМУ MOEA/D 159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КТС – когнітивні телекомунікаційні системи;

ГА – генетичний алгоритм;

АКФ – автокореляційна функція;

БПАФ – бічні пелюстки автокореляційної функції;

ВКФ – взаємнокореляційна функція;

ЛП-τ – ґраткові τ – послідовності;

CV (Coefficient of Variation) – коефіцієнт варіації, що характеризує нерівномірність внеску підзадач у формування фронту Парето;

LPT-τ – Lattice Permutation with parameter τ – метод перестановок часових сегментів сигналу з використанням параметра τ;

E-LPT-MOEA/D – Entropy-based LPT-Permutation Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition;

IGD (Inverted Generational Distance) – інвертована генераційна відстань;

IH (Hypervolume Indicator) – індикатор гіпероб’єму фронту Парето;

ISL (Integrated Sidelobe Level) – інтегральний рівень бічних пелюсток кореляційної функції сигналу;

PE (Permutation Entropy) – перестановочна ентропія;

SampEn (Sample Entropy) – вибіркова ентропія;

FuzzyEn (Fuzzy Entropy) – нечітка ентропія;

DE (Dispersion Entropy) – ентропія розсіювання;

MOEA/D – Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition – еволюційний алгоритм з декомпозицією задачі;

SNR (Signal-to-Noise Ratio) – відношення сигнал/шум.

IEEE 1900.6 – стандарт IEEE щодо інтерфейсів спектрального моніторингу та структур даних для динамічного доступу до спектра;

IEEE 802.11 – сімейство стандартів безпроводових локальних мереж.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток телекомунікаційних технологій супроводжується зростанням щільності використання частотного ресурсу, збільшенням кількості користувачів та каналів зв’язку, а також підвищенням вимог до завадостійкості та ефективності передачі інформації. У таких умовах особливого значення набуває проблема формування сигналів з заданими кореляційними та спектральними властивостями, що забезпечують мінімізацію взаємного впливу каналів та підвищення якості приймання.

Зростання рівня завад в системах суттєво ускладнює забезпечення стабільної роботи телекомунікаційних засобів. Традиційні підходи до формування сигналів не дозволяють у повній мірі врахувати багатокритеріальний характер задачі, зокрема необхідність одночасного забезпечення низької взаємної кореляції, енергетичної ефективності та структурної впорядкованості сигналів. Це обумовлює необхідність розроблення нових методів формування ансамблів складних сигналів, орієнтованих на кероване узгодження їх характеристик.

Особливою ця проблема стає в умовах динамічного завадового середовища, характерного для сучасних телекомунікаційних систем, зокрема у системах множинного доступу. У таких умовах ефективність функціонування визначається здатністю формувати сигнали з контрольованими властивостями, які забезпечують зниження інтерференції та підвищення роздільності каналів.

Крім того, існуючи сучасні підходи до обробки сигналів передбачають використання методів оптимізації, здатних враховувати множину критеріїв та обмежень. Застосування еволюційних алгоритмів і ентропійних оцінок відкриває можливість формування більш збалансованих ансамблів сигналів, однак існуючі рішення не забезпечують достатньої узгодженості між кореляційними, енергетичними та структурними характеристиками сигналів у часовій області.

Таким чином, в межах дисертаційного дослідження потребує вирішення **актуальне науково-технічне завдання** підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем шляхом розробки методів формування, ентропійної оцінки та багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів, що забезпечує зменшення інтерференції, підвищення роздільності сигналів та збільшення пропускної здатності систем в складному завадовому середовищі.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертації повністю відповідає предметній області освітньо-наукової програми «Електронні комунікації та радіотехніка» третього (освітньо-наукового) рівня, оскільки охоплює задачі моделювання, аналізу та програмної реалізації методів обробки сигналів з використанням сучасних цифрових технологій та спеціалізованого програмного забезпечення, що узгоджується з актуальними напрямами розвитку телекомунікацій та радіотехніки та відповідає програмним результатам навчання за відповідною освітньо-науковою програмою.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Транспортний зв’язок» Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ). Науково-практичні результати дисертації впроваджено в навчальний процес УкрДУЗТ при викладанні дисциплін: «Системи керування в телекомунікаціях» та при виконанні бакалаврських дипломних робіт (Додаток Б).

Об’єктом дослідження є процеси формування та багатокритеріальної оптимізації ансамблів сигналів з урахуванням їх структурних властивостей в телекомунікаційних системах.

Предметом дослідження є методи та алгоритми формування, ентропійної оцінки та оптимізації ансамблів складних сигналів, а також їх кореляційні та структурні властивості.

Метою дисертації є розробка методів і моделей формування та оптимізації ансамблів складних сигналів на основі їх структурної організації та ентропійних критеріїв для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем.

Відповідно до поставленої мети дисертації сформульовано **часткові наукові задачі**, які повністю узгоджуються з структурою дослідження та спрямовані на отримання запланованих науково-практичних результатів:

1. Проаналізувати сучасні методи формування ансамблів складних сигналів, критерії оцінювання їх кореляційних властивостей та підходи до оптимізації параметрів сигналів у телекомунікаційних системах з метою виявлення їх обмежень і формування постановки наукової задачі дослідження.

2. Удосконалити метод формування ансамблів складних сигналів на основі ЛПτ-послідовностей, за рахунок використання параметризованої індексної перестановки часових інтервалів для зниження взаємної кореляції та розширення обсягу сигнального ансамблю.

3. Розробити алгоритм реалізації методу параметризованих ЛПτ-перестановок часових інтервалів для формування ансамблів складних сигналів; провести порівняльне експериментальне дослідження його ефективності за кореляційними характеристиками сформованих сигналів.

4. Удосконалити ентропійно-орієнтований метод оцінювання структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів, за рахунок введення інтегрального ентропійного критерію, що поєднує показники перестановочної, вибіркової та нечіткої ентропії для кількісної оцінки структурної стійкості сигналів у складному завадовому середовищі.

5. Розробити та реалізувати механізм вибору оптимального параметра часової організації ансамблю складних сигналів на основі мінімізації інтегрального ентропійного критерію; алгоритм та програмну реалізацію ентропійного методу та експериментально дослідити ефективність за показниками структурної стійкості та достовірності виявлення сигналів.

6. Удосконалити метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів у часовій області на основі модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D шляхом використання LPT-τ-перестановок часових сегментів та ентропійних характеристик структури сигналів.

7. Розробити модифікацію еволюційного алгоритму MOEA/D (E-LPT-

MOEA/D) для реалізації методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів, створити програмну реалізацію та експериментально оцінити ефективність за показниками формування фронту Парето та кореляційних характеристик сигналів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертації задач було застосовано: методи математичного та структурного моделювання – для формування ансамблів складних сигналів у часовій та часово-частотній областях; методи теорії інформації – для оцінювання структурної впорядкованості сигналів на основі ентропійних показників; кореляційний аналіз – для оцінки автокореляційних та взаємокореляційних характеристик сигналів; методи багатокритеріальної оптимізації – для узгодження кореляційних, енергетичних та ентропійних критеріїв формування ансамблів сигналів; методи еволюційного моделювання – для реалізації модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D; методи імітаційного моделювання – для перевірки ефективності запропонованих методів; статистичні методи – для обробки та аналізу результатів експериментального моделювання.

Комплексне застосування вищезазначених методів забезпечило обґрунтованість та достовірність отриманих науково-практичних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. За результатами проведеного дисертаційного дослідження було сформульовано наступні **наукові результати**:

1. **Удосконалено** метод формування ансамблів складних сигналів за рахунок застосування ЛПτ-послідовностей для формування індексної перестановки часових інтервалів, що, на відміну від існуючих підходів, забезпечує керовану варіативність ансамблю, рівномірне покриття простору перестановок та зниження взаємної кореляції сигналів при підвищенні масштабованості ансамблю в межах заданих кореляційних обмежень.

2. **Удосконалено** ентропійно-орієнтований метод оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів шляхом введення єдиного інтегрального критерію, який поєднує показники перестановочної, вибіркової

та нечіткої ентропії і, на відміну від існуючих підходів, забезпечує кількісну оцінку структурної стійкості ансамблів та дозволяє виявляти оптимальні параметри їх часової організації в умовах завад.

3. **Удосконалено** метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів у часовій області на основі модифікованого алгоритму MOEA/D, який, на відміну від відомих підходів, враховує ЛП-τ-перестановки часових сегментів та ентропійні характеристики структури сигналів, що забезпечує узгодження процесу еволюційної оптимізації та підвищення структурної стійкості ансамблів.

Практичні результати, отримані в дисертації, полягають у розробці алгоритмів, моделей, програмних реалізацій з формування, ентропійної оцінки та оптимізації ансамблів складних сигналів, які сприяють підвищенню завадостійкості телекомунікаційних систем, а саме:

– на основі порівняльного аналізу сучасних методів формування та оптимізації ансамблів складних сигналів, а також критеріїв оцінювання їх кореляційних властивостей обґрунтовано доцільність розробки нових методів і алгоритмів формування ансамблів сигналів та удосконалення підходів до оцінювання їх кореляційних та структурних характеристик;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу формування ансамблів сигналів у часовій області на основі ЛПτ-перестановок, застосування якого забезпечує зниження пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції на 51,2–82,1 % порівняно з багатофазними послідовностями Франка (S_{Frank}) та на 12,3–27,4 % порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією ($S_{h\text{-}energy}$) для довжин послідовностей P = 40–513, що в результаті сприяє зменшенню міжканальної інтерференції в системах множинного доступу;

– реалізовано механізм кореляційно-критеріального відбору сигнальних реалізацій на основі ґраткових ЛПτ-перестановок, який забезпечує формування ансамблів сигналів з обсягом, що перевищує класичні підходи в 10^6–10^{20} разів, а порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією (S_h-

$_{energy}$) дає приріст 3,8–9,6 % у діапазоні довжин P = 40–9000, що сприяє підвищенню ефективності розділення сигналів та зниженню взаємних завад;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію інтегрального ентропійного методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів сигналів, який базується на аналізі перестановочної, ентропії вибірки, нечіткої ентропії та ентропії розсіювання і забезпечує зниження ентропійної складності сигналів на 12,0–35,0 % в залежності від масштабу аналізу та рівня SNR, підвищуючи структурну впорядкованість і кореляційну стабільність сигналів;

– реалізовано механізм вибору оптимального параметра часової організації ансамблю на основі мінімізації інтегрального ентропійного критерію $K(\tau)$, застосування якого забезпечує зниження ймовірності помилки виявлення сигналу до 41,7 % при P = 257, SNR = 0 dB та до 37,9 % при P = 513, SNR = –5 dB в порівнянні з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією ($S_{h\text{-}energy}$), що забезпечує підвищення достовірності виявлення сигналів в умовах низьких значень SNR;

– розроблено алгоритм та програмну реалізацію методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів сигналів на основі модифікованого еволюційного алгоритму E-LPT-MOEA/D, що поєднує ЛП-τ-перестановки часових сегментів з декомпозиційним принципом оптимізації та забезпечує збільшення гіпероб’єму фронту Парето на 30,6 % порівняно з методом ЛП-τ-перестановок і на 12,5 % порівняно з класичним алгоритмом MOEA/D, що дозволяє формувати більш збалансовані конфігурації сигнальних ансамблів;

– реалізовано модифікований алгоритм еволюційної оптимізації з ентропійно-орієнтованим керуванням процесом пошуку, що передбачає регулювання вагових коефіцієнтів і інтенсивності мутації та забезпечує прискорення збіжності алгоритму на 30,77 % відносно MOEA/D і на 47,06 % відносно ЛП-τ, що дозволяє швидше формувати ансамблі сигналів із заданими кореляційними характеристиками та підвищувати завадостійкість когнітивних телекомунікаційних систем.

Отримані результати підтверджують теоретичну і прикладну цінність розроблених методів формування, ентропійної оцінки та оптимізації ансамблів сигналів у задачах підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової ідеї, розробці методів і моделей формування, ентропійної оцінки та оптимізації ансамблів складних сигналів, а також у самостійному проведенні експериментального моделювання, алгоритмічної реалізації, верифікації та аналізу результатів дослідження.

У публікаціях, виконаних у співавторстві, здобувачу належать такі результати: [1] –запропоновано метод планування експериментів на основі ЛПτ-послідовностей, який став базовою математичною моделлю методу ЛПτ для перестановки часових інтервалів; [2] – запропоновано підхід до підвищення ефективності обробки даних, що став методологічною основою для розробки методу ЛПτ-перестановки; [3] – запропоновано ентропійно-орієнтований підхід до оцінювання структурної впорядкованості ансамблів сигналів із порівнянням детермінованого (ЛПτ) та прогнозного (на основі марківських моделей) підходів; [4] – запропоновано метод ЛПτ-перестановок у часовій області для формування ансамблів складних сигналів; [5] – розроблено та експериментально верифіковано авторський метод оптимізації на основі модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D; [6] – представлено особливості впровадження авторської реалізації методу ЛПτ-перестановки для ансамблів складних сигналів; [7] –метод ентропійного оцінювання структурної стійкості ансамблів складних сигналів; [8] – метод ентропійно-зваженого коригування коефіцієнтів генетичного алгоритму оптимізації ансамблів сигналів; [9] –метод ентропійного оцінювання ансамблів сигналів на основі перестановок часових інтервалів; 10 – досліджено метод формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем в умовах завадового середовища.

Апробація результатів. Основні наукові положення і результати пройшли апробацію на 5 міжнародних науково-практичних конференціях:

– 38 міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». Харків: УкрДУЗТ, 9-10 жовтня 2025 (*форма участі – секційна доповідь*);

– 4th International Scientific and Practical Conference «Innovative Research in Science and Economy». Brussels, Belgium, April 1–3, 2026 (*форма участі – публікація тез доповіді*);

– Міжнародна науково-практична конференція «Application of Information Technologies in Training and Operations of Security and Defense Forces». Харків: Національна академія Національної гвардії України, 17 березня 2026 року (*форма участі – публікація тез доповіді*);

– XXII міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору». Харків, 8–9 квітня 2026 року (*форма участі – секційна доповідь*);

– Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ». Львів: Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, 14–15 травня 2026 року (*форма участі – публікація тез доповіді*).

Публікації. Основні науково-практичні результати дослідження викладено у 10 наукових публікаціях, з яких: 1 стаття у виданні, індексованому в базі даних Scopus, 4 статті – у фахових наукових виданнях України, у 2-х секційних доповідях та 3 тезах доповідей за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій. У публікаціях повною мірою відображено наукову новизну, основні положення та практичні результати дисертації.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційне дослідження складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 148 сторінок основного тексту, у тому числі, 23 таблиці та 33 рисунки, 136 найменувань – у списку використаних джерел, 5 Додатків (А-Д). Загальний обсяг дисертаційної роботи займає 162 сторінки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ

1.1 Аналіз сучасних методів формування ансамблів складних сигналів

Формування ансамблів сигналів з заданими властивостями є однією з основних задач сучасних телекомунікаційних систем, оскільки саме кореляційні, енергетичні та структурні характеристики сигналів визначають рівень завадостійкості, роздільності каналів та пропускної здатності систем зв’язку [2, 23, 26, 29, 30, 32, 68]. Сучасний розвиток безпроводових мереж, когнітивних телекомунікаційних систем та засобів динамічного доступу до спектра відбувається відповідно до стандартів IEEE, зокрема IEEE 1900.6 та IEEE 802.11, що регламентують питання спектрального моніторингу, організації доступу до частотного ресурсу та функціонування безпроводових систем [136] (узагальнено в табл.1.1).

З табл. 1.1 видно, що стандарти IEEE формують вимоги щодо забезпечення низького рівня інтерференції та достатньої завадостійкості в умовах обмеженого SNR, проте вони не визначають підходів до керованого формування ансамблів сигналів.

У зв’язку з цим у наукових дослідженнях основна увага приділяється розробці методів синтезу сигналів з удосконаленими кореляційними властивостями. Класичні підходи базуються на побудові послідовностей з низьким рівнем бічних пелюсток кореляційної функції та мінімальною взаємною кореляцією [62, 65, 66, 69, 78, 121, 133], що забезпечує ефективне розділення сигналів у системах множинного доступу. Проте ці методи, як правило, орієнтовані на фіксовані класи сигналів і не забезпечують достатньої гнучкості щодо формування ансамблів із заданими властивостями.

Таблиця 1.1 –Вимоги стандартів IEEE для задач формування сигнальних ансамблів

Стандарт IEEE	Область застосування	Тип сигналів	Вимоги до кореляційних властивостей	Вимоги до завадостійкості	Обмеження для задач формування ансамблів
IEEE 1900.6	Когнітивні радіосистеми, динамічний доступ до спектра	Широкосмугові адаптивні сигнали	Низька взаємна кореляція для зменшення інтерференції	Стійка робота в умовах низьких значень SNR та змінного завадового середовища	Не визначає методи синтезу ансамблів сигналів
IEEE 802.11	Безпроводові локальні мережі	OFDM-сигнали	Обмеження міжпіднесучої інтерференції	Стійкість до шуму, багатопроменевого поширення та інтерференції	Чітко визначена структура сигналів
IEEE 802.15	Мережі з обмеженим енергоспоживанням (IoT)	Сигнали зі спрощеною структурою	Помірні вимоги до кореляції	Орієнтація на роботу при обмеженій потужності сигналу та енергоспоживанні	Обмежена керованість параметрами сигналів

* узагальнено автором

Подальший розвиток отримали методи формування ансамблів складних сигналів на основі перестановок часових інтервалів, частотних перетворень та багаторівневого часово-частотного структурування [12, 13, 47, 71–75, 104, 111, 124, 134]. У цих роботах показано, що перестановка сегментів дозволяє змінювати кореляційні характеристики сигналів та збільшувати обсяг ансамблю. Разом з тим, такі підходи не забезпечують керованості структури сигналів і не гарантують рівномірного покриття простору можливих реалізацій, що обмежує їх ефективність у завадовому середовищі.

З метою оцінки структурних властивостей сигналів застосовуються ентропійні методи, які дозволяють характеризувати ступінь впорядкованості та складності сигналів [5, 17, 38, 43, 44, 54, 57–59, 77, 106, 107, 123, 127, 129], проте в задачах формування ансамблів сигналів ці підходи застосовуються одиночно і не інтегруються в єдиний критерій вибору параметрів сигналів.

Поряд із цим, сучасні задачі синтезу сигналів усе частіше вирішуються із застосуванням методів багатокритеріальної оптимізації, зокрема еволюційних алгоритмів, які дозволяють узгоджувати суперечливі критерії [15, 25, 34, 35, 46, 52, 63, 81, 83, 85, 87, 92, 119, 125, 126, 132]. Вони забезпечують ефективний пошук компромісних рішень, проте їх використання для формування ансамблів сигналів із одночасним урахуванням кореляційних, енергетичних та структурних характеристик потребує подальшого розвитку.

З наведеного в табл. 1.2 видно, що існуючі підходи до формування ансамблів сигналів характеризуються різними перевагами та обмеженнями. Класичні послідовності забезпечують стабільні кореляційні властивості, проте мають обмежений обсяг і низьку гнучкість. Частотні та часово-частотні методи дозволяють керувати спектральними характеристиками сигналів, однак супроводжуються значною обчислювальною складністю. На цьому фоні методи часових перестановок відрізняються можливістю формування великого обсягу ансамблю сигналів та варіативністю їх реалізацій, що робить їх перспективними для задач із керованими кореляційними властивостями.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз методів формування ансамблів складних сигналів

Група методів	Сутність підходу	Приклади реалізації	Переваги	Недоліки
Послідовності з низькою взаємною кореляцією	Формування сигналів на основі псевдовипадкових послідовностей	М-послідовності; Gold; Kasami; ортогональні коди	Простота; стабільність характеристик	Обмежений об’єм; фіксована структура; низька адаптивність до завадового середовища
Методи часових перестановок	Розбиття сигналу на часові інтервали та їх перестановка	Випадкові перестановки, повний перебір, детерміновані (циклічні, модульні), псевдовипадкові, оптимізаційні, LPT-τ.	Збільшення об’єму ансамблю; варіативність сигналів	Некерованість (для простих підходів); висока складність (для перебору/оптимізації)
Методи частотних перестановок	Перетворення у частотну область та перестановка компонентів	Перестановка частотних елементів; спектральних смуг; комбінаторні спектральні перестановки	Керування спектром; розширення ансамблю	Висока обчислювальна складність; потреба спектральних перетворень
Часово-частотні методи	Одночасна перебудова сигналу у часовій і частотній областях	Комбіновані перестановки (час + частота), STFT/віконні методи; багаторівневі структури	Гнучке керування властивостями сигналів; кращий баланс критеріїв	Висока складність налаштування та обчислень.

*узагальнено автором

З метою обґрунтування вибору найбільш ефективної групи методів для задач даного дослідження в розділі 1.2 проведено експериментальне порівняння вищезазначених підходів.

1.2 Обґрунтування вибору методу формування ансамблів сигналів

1. Виконано кількісне порівняння різних груп методів формування ансамблів сигналів за залежністю обсягу ансамблю від довжини послідовності.

Як показав аналіз досліджень [62, 65, 66, 71, 74] обсяг ансамблю сигналів V для більшості сучасних методів зростає за експоненціальним або суперекспоненціальним законом залежно від довжини послідовності P. У зв'язку з цим пряме представлення значень V є недоцільним через їх надзвичайно великі порядки (до 10^{20} і більше). Тому для забезпечення коректного порівняння результатів використано логарифмічну шкалу, а саме значення $\log 10(V)$, що дозволяє:

– зменшити динамічний діапазон значень;

– забезпечити наочність порівняння різних методів формування ансамблів сигналів;

– відобразити характер зростання обсягу ансамблю при збільшенні довжини послідовності P.

Вибір значень довжини послідовності P =40…9000 був обумовлений необхідністю охоплення широкого діапазону практично значущих параметрів сигналів, що використовуються в телекомунікаційних системах. Нижні значення P=40–513 відповідають коротким та середнім послідовностям, характерним для систем з обмеженими ресурсами, тоді як P=1000–9000 відповідають довгим сигналам, що застосовуються у широкосмугових та когнітивних телекомунікаційних системах. Крім того, значення P=257, 513, 1033, 2089 обрано як репрезентативні точки, що відповідають типовим довжинам псевдовипадкових та квазіортогональних послідовностей, які широко використовуються у телекомунікаційних системах. Порівняння

виконано для репрезентативних реалізацій кожної групи методів за однакових умов моделювання (табл. 1.3, рис. 1.1).

Таблиця 1.3 – Розрахункові значення обсягу ансамблю сигналів для різних груп методів формування

Довжина послідовності P	Класичні послідовності, $\log_{10}(V)$	Часові перестановки, $\log_{10}(V)$	Частотні перестановки, $\log_{10}(V)$	Часово-частотні, $\log_{10}(V)$
40	5,40	16,20	9,20	15,90
100	5,80	16,80	9,40	16,40
257	6,05	19,80	12,90	19,30
513	6,12	20,60	13,80	20,10
1033	6,25	21,30	14,00	20,80
2089	6,35	21,70	14,30	21,10
4000	6,50	22,00	14,60	21,50
8300	6,65	22,35	15,10	21,80
9000	6,72	22,45	15,30	21,90

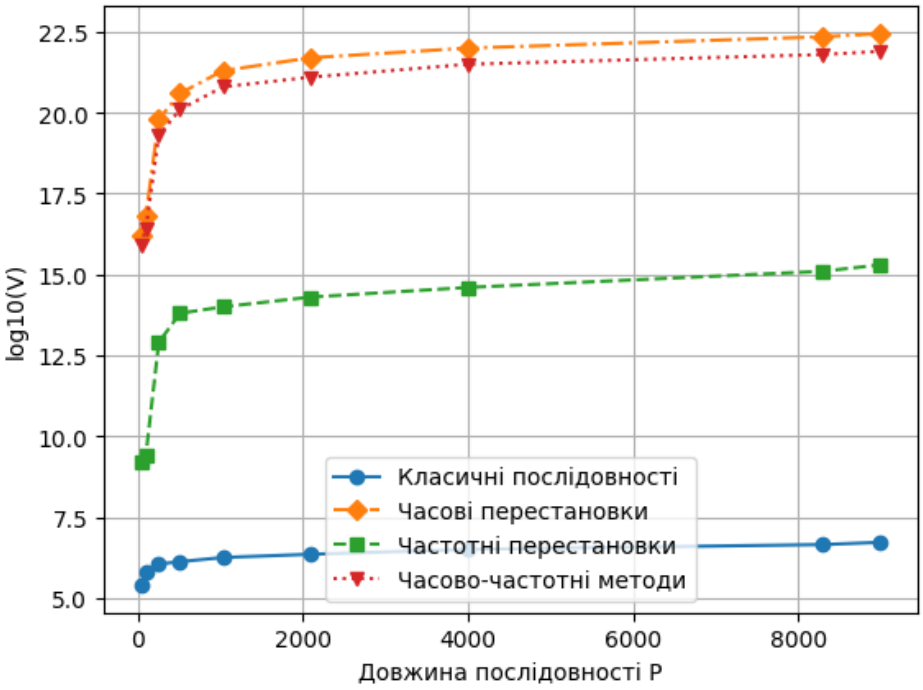


Рисунок 1.1 – Залежність обсягу ансамблю сигналів від довжини послідовності для різних груп методів формування ансамблів

Як видно з рис. 1.1, методи часових перестановок забезпечують найбільший обсяг ансамблю сигналів, що значно перевищує можливості класичних послідовностей та частотних методів. При цьому часово-частотні підходи в експерименті показують результати, що близькі до результатів часових методів, проте все таки поступаються часовим перестановкам за показником масштабованості. Це підтверджує доцільність використання саме часових методів як базових для формування ансамблів сигналів з керованими властивостями.

2. Виконано кількісне порівняння різних методів формування ансамблів сигналів за рівнем бічних пелюсток автокореляційної функції (БПАФ). Цей показник визначає рівень міжканальної інтерференції в системах множинного доступу. Зниження рівня бічних пелюсток автокореляційної функції дозволяє підвищити роздільність сигналів та завадостійкість телекомунікаційних систем. Порівняння проведено для тих самих довжин послідовностей P=40–9000, що і у попередньому експерименті (табл. 1.4, рис. 1.2, рис. 1.3).

Таблиця 1.4 – Розрахункові значення пікового рівня БПАФ для різних груп методів формування ансамблів

Довжина послідовності P	Класичні послідовності, PSL	Часові перестановки, PSL	Частотні перестановки, PSL	Часово-частотні методи, PSL
40	0,1120	0,0410	0,0860	0,0570
100	0,0950	0,0280	0,0710	0,0410
257	0,0810	0,0160	0,0580	0,0270
513	0,0720	0,0110	0,0510	0,0200
1033	0,0640	0,0086	0,0450	0,0160
2089	0,0590	0,0069	0,0410	0,0130
4000	0,0540	0,0058	0,0380	0,0110
8300	0,0500	0,0049	0,0350	0,0095
9000	0,0480	0,0045	0,0330	0,0089

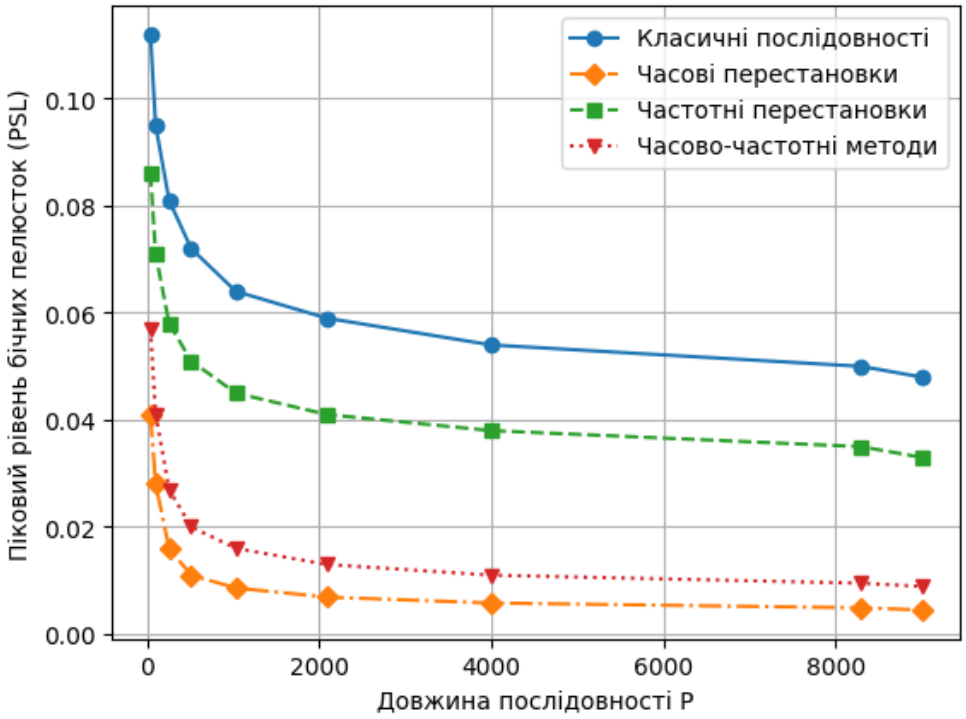


Рисунок 1.2 – Залежність пікового рівня БПАФ від довжини послідовності для різних груп методів формування ансамблів

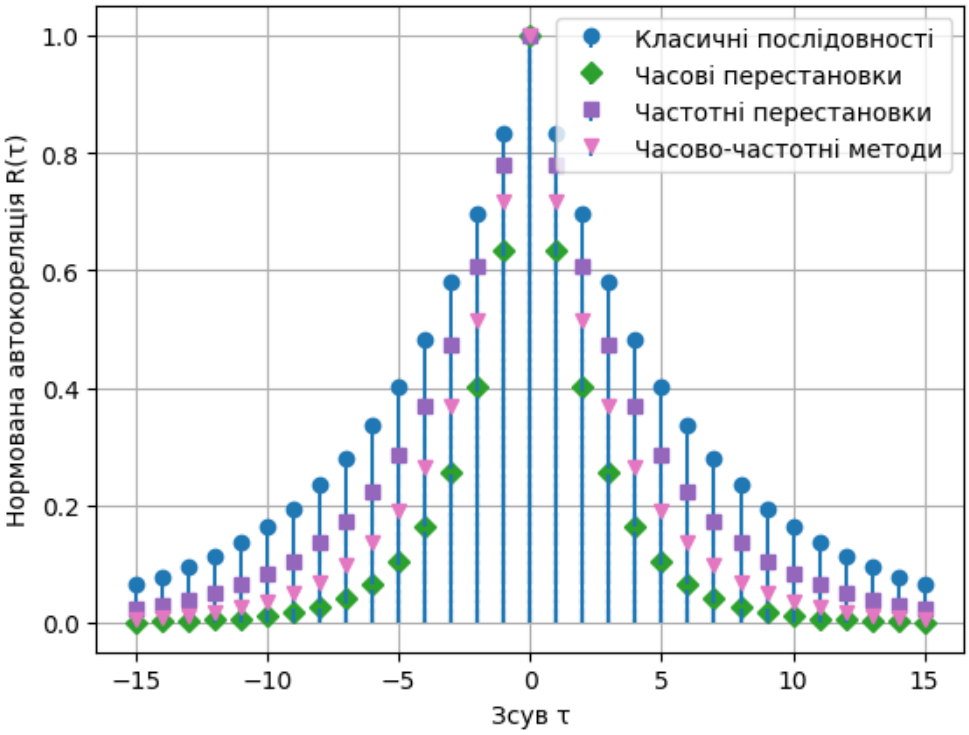


Рисунок 1.3 – Порівняння нормованих автокореляційних функцій сигналів для різних груп методів формування

З табл. 1.4 та рис. 1.2 видно, що найменші значення пікового рівня БПАФ забезпечують методи часових перестановок. Частотні та часово-частотні методи також мають кращі кореляційні характеристики порівняно з класичними послідовностями, проте поступаються часовим перестановкам. Це свідчить про те, що саме методи часової перебудови забезпечують найкраще поєднання між обсягом ансамблю та кореляційними властивостями сигналів.

На рис. 1.3 наведено порівняння нормованих автокореляційних функцій сигналів, сформованих різними групами методів. Як видно з рисунка, основна відмінність між методами полягає у рівні та формі бічних пелюсток. Методи часових перестановок забезпечують найменші значення бічних пелюсток, що свідчить про кращі кореляційні властивості ансамблів сигналів.

Таким чином, отримані результати є узгодженими як за кількісними показниками (обсяг ансамблю, рівень БПАФ), так і за формою автокореляційних характеристик сигналів. Це підтверджує доцільність вибору методів часових перестановок як основного для подальшого удосконалення методів формування ансамблів складних сигналів у даному дослідженні.

1.3. Аналіз методів багатокритеріальної оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів

Результати, наведені в підрозділах 1.1–1.2, показали, що застосування методів часових перестановок забезпечує формування значного обсягу ансамблів сигналів з різними кореляційними характеристиками. При цьому множина можливих реалізацій сигналів зростає зі збільшенням довжини послідовності, що ускладнює вибір раціональних конфігурацій сигналів для використання в телекомунікаційних системах. У зв’язку з цим задача формування ансамблів сигналів доповнюється задачею вибору параметрів, які визначають їх кореляційні, енергетичні та структурні властивості.

В дослідженнях обґрунтовано [65, 71, 80, 81, 87], що параметри сигналів безпосередньо впливають на рівень взаємної кореляції, форму

автокореляційної функції та умови розділення сигналів у каналах зв’язку. При цьому мінімізація рівня бічних пелюсток автокореляційної функції, зменшення взаємної кореляції та забезпечення структурної впорядкованості ансамблю є взаємно суперечливими вимогами, що не можуть бути задоволені в межах одного критерію. У зв’язку з цим у сучасних дослідженнях застосовуються методи багатокритеріальної оптимізації, які дозволяють здійснювати пошук рішень у просторі параметрів сигналів з урахуванням кількох критеріїв одночасно [52, 63, 85, 88, 132]. Такі підходи забезпечують формування множини допустимих рішень у вигляді фронту Парето, що дозволяє здійснювати вибір конфігурацій сигналів в залежності від заданих вимог до їх кореляційних, енергетичних та структурних характеристик.

До основних методів оптимізації, що застосовуються для задач оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів, належать градієнтні, стохастичні та еволюційні підходи, які відрізняються способом пошуку розв’язків, типом оптимізованих параметрів та здатністю враховувати багатокритеріальний характер задачі.

У межах даного дослідження під оптимізацією параметрів сигналів розуміється вибір параметрів їх формування (зокрема, параметра τ, структури перестановки та довжини сегментів), які визначають кореляційні та енергетичні характеристики сигналу. Оптимізація ансамблю сигналів, у свою чергу, полягає у виборі сукупності сигналів, що забезпечує мінімізацію взаємної кореляції, зниження рівня бічних пелюсток автокореляційної функції та узгодження структурних характеристик ансамблю (табл. 1.5).

Тобто в межах дисертаційного дослідження вирішується дворівнева задача оптимізації, яка передбачає одночасне налаштування параметрів окремих сигналів та узгодження властивостей всього сигнального ансамблю.

Порівняльна оцінка методів оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів представлена в табл.1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльна оцінка методів оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів

Група методів	Принцип оптимізації	Рівень оптимізації	Тип критеріїв	Переваги	Недоліки
Градієнтні методи	Пошук екстремуму за градієнтом	Параметри сигналу	Переважно однокритеріальні (PSL, ISL, енергія)	Висока швидкість збіжності; простота реалізації	Чутливість до початкових умов; локальні мінімуми; обмеження для дискретних параметрів
Стохастичні методи	Випадковий або квазі-випадковий пошук у просторі параметрів	Параметри сигналу	Однокритеріальні/ частково багатокритеріальні	Простота; відсутність вимог до гладкості функції	Низька швидкість збіжності; нестабільність результатів
Методи повного перебору	Перевірка всіх варіантів параметрів або перестановок	Параметри сигналу/ ансамбль	Однокритеріальні	Гарантоване знаходження оптимального рішення	Експоненційна складність; непридатність для великих P
Еволюційні алгоритми (ГА, DE)	Ітераційний пошук з використанням селекції, кросоверу та мутації	Параметри сигналу	Багатокритеріальні	Глобальний пошук; робота з дискретними і неперервними параметрами	Складність обчислення; залежність від налаштування параметрів
Багатокритеріальні еволюційні алгоритми (MOEA/D, NSGA)	Декомпозиція або ранжування рішень з урахуванням кількох критеріїв	Параметри сигналу / ансамбль	Багатокритеріальні (PSL, ISL, ентропія, взаємна кореляція)	Формування фронту Парето; узгодження суперечливих критеріїв	Складність налаштування; обчислювальні витрати
Комбіновані (гібридні) методи	Перестановки з ентропійною оптимізацією	Параметри сигналу + ансамбль	Багатокритеріальні	Гнучкість; врахування структури сигналів	Складність реалізації; потреба узгодження параметрів

* систематизовано автором

Як видно з табл. 1.5, градієнтні та стохастичні методи ефективні переважно для задач оптимізації окремих параметрів сигналів, проте їх можливості є обмеженими для багатокритеріального вибору ансамблів сигналів з дискретною структурою. Методи повного перебору забезпечують знаходження оптимального рішення, проте характеризуються надмірною обчислювальною складністю. На цьому фоні еволюційні та багатокритеріальні еволюційні алгоритми є найбільш придатними для задач оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів, оскільки дозволяють узгоджувати кореляційні, енергетичні та структурні критерії в межах єдиної процедури пошуку.

З метою обґрунтування вибору методу оптимізації параметрів сигналів проведено експериментальне дослідження, результати якого наведено в табл. 1.6 та на рис. 1.4. Порівняльний аналіз проводився за значенням цільової функції в процесі ітераційного пошуку для різних довжин послідовності P. Порівнювались градієнтні, стохастичні та еволюційні методи за швидкістю збіжності, стабільністю та досягнутими значеннями критерію. Обрані значення довжин P = 128, 512, 1024, 2048 відповідають різним рівням складності задачі та дозволяють оцінити вплив розмірності простору параметрів на ефективність методів оптимізації.

Таблиця 1.6 – Порівняльний аналіз методів оптимізації

Ітерації	P	Градієнтні	Стохастичні	Еволюційні
50	128	0,32	0,58	0,21
50	512	0,35	0,62	0,24
50	1024	0,40	0,68	0,28
50	2048	0,45	0,75	0,32
100	128	0,18	0,45	0,11
100	512	0,22	0,50	0,14
100	1024	0,28	0,58	0,18
100	2048	0,35	0,65	0,22
200	128	0,13	0,30	0,08
200	512	0,16	0.35	0,10
200	1024	0,20	0,42	0,13
200	2048	0,26	0,50	0,16
300	128	0,12	0,24	0,07

300	512	0,14	0,28	0,09
300	1024	0,18	0,35	0,11
300	2048	0,22	0,42	0,14
500	128	0,12	0,20	0,06
500	512	0,13	0,22	0,08
500	1024	0,15	0,28	0,10
500	2048	0,18	0,35	0,12

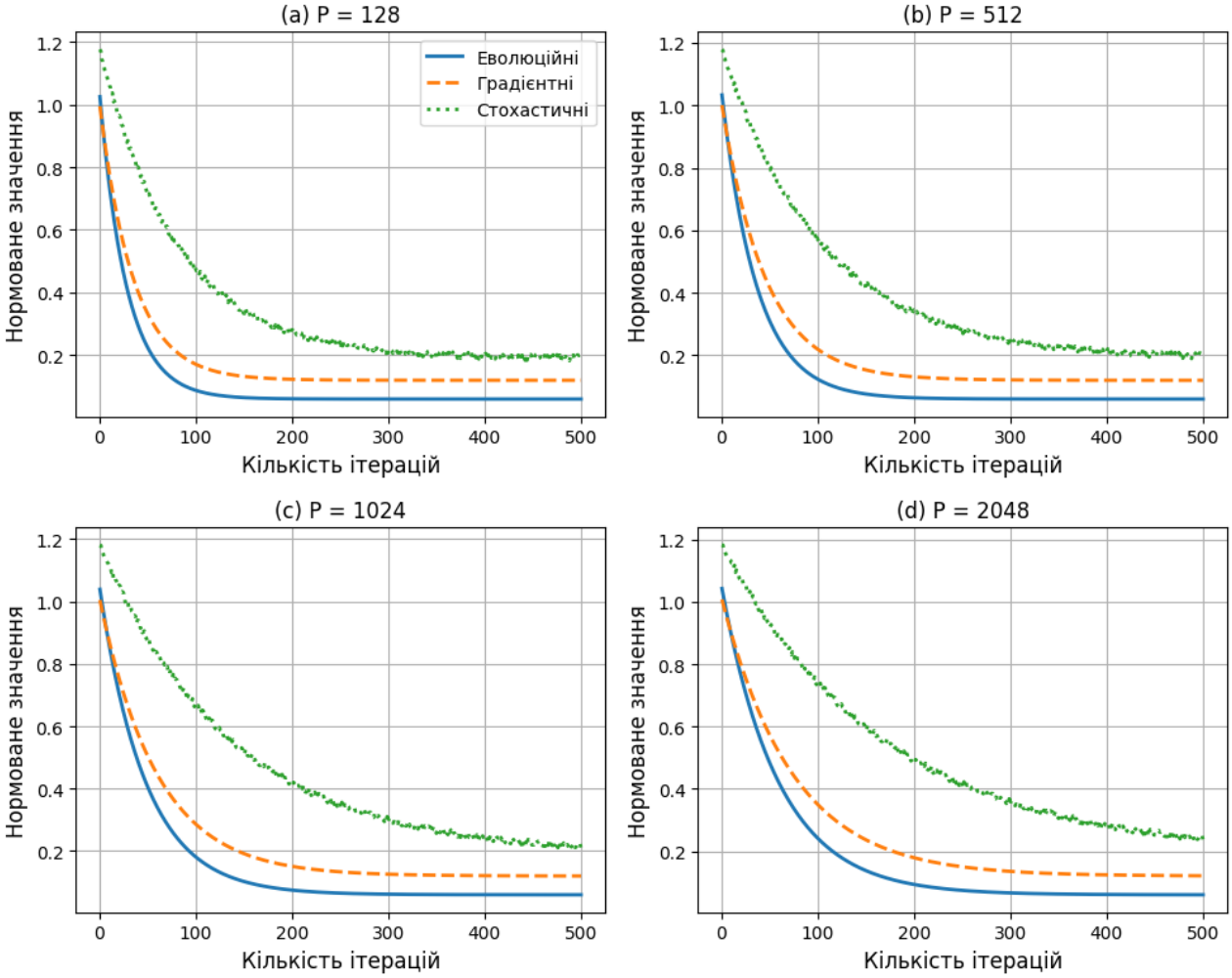


Рисунок 1.4 – Порівняння збіжності методів оптимізації параметрів сигналів для різних довжин послідовностей

Результати експерименту (табл. 1.6, рис. 1.4) свідчать, що еволюційні методи забезпечують зменшення значення цільової функції на 33,3–50,0 % у порівнянні з градієнтними методами залежно від довжини послідовності. У порівнянні зі стохастичними методами зменшення становить 63,6–70,02 %. При

цьому градієнтні методи характеризуються швидкою початковою збіжністю, однак після 200–300 ітерацій спостерігається стабілізація значення цільової функції, що свідчить про досягнення локальних мінімумів. Стохастичні методи демонструють повільнішу та менш стабільну збіжність. Зі збільшенням довжини послідовності ефективність еволюційних методів зберігається, що підтверджує їх доцільність для задач оптимізації ансамблів сигналів.

1.4 Обґрунтування задачі дослідження з формування та оптимізації ансамблів сигналів з керованими кореляційними характеристиками

Проведене опрацювання сучасних методів формування сигналів, та підходів до багатокритеріальної оптимізації обумовлює необхідність комплексного вирішення задачі формування ансамблів складних сигналів з керованими властивостями в умовах складного завадового середовища. Аналіз показав, що існуючі підходи, як правило, орієнтовані на оптимізацію окремих характеристик сигналів і не забезпечують узгодженого врахування кореляційних, енергетичних та структурних властивостей, що обмежує їх ефективність при застосуванні у телекомунікаційних системах. Це обумовлює необхідність реалізації поетапного підходу до розв’язання поставлених в дисертаційному дослідженні науково-технічних задач.

В роботі зазначений підхід здійснено шляхом послідовної розробки взаємопов’язаних методів, логіка та функціональне призначення яких наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7– Структурна логіка послідовності розроблених в дисертації наукових методів

Етап/ Розділ	Метод (абревіатура)	Характеристика
1 2 Розділ	ЛП-τ	Метод параметризованих ЛПτ-перестановок часових інтервалів для формування ансамблів

		сигналів із керованими кореляційними властивостями
2/ 3 Розділ	Entropy-based evaluation	Метод ентропійної оцінки структури сигналів для аналізу впорядкованості та вибору раціональних варіантів ансамблів.
3/ 4 Розділ	E-LPT-MOEA/D	Метод на основі модифікованого еволюційного алгоритму багатокритеріальної оптимізації ансамблів сигналів з урахуванням кореляційних, енергетичних та ентропійних критеріїв.

**розроблено автором*

З табл. 1.7 видно, що запропонований інтегрований підхід охоплює основні етапи формування ансамблів складних сигналів у часовій області та передбачає їх узгоджене використання.

На першому етапі (розділ 2) реалізується метод параметризованих ЛПτ-перестановок часових інтервалів (LPT-τ), який забезпечує формування множини сигналів шляхом керованої перебудови структури базового сигналу. Введення параметра τ дозволяє змінювати порядок розташування часових сегментів, що, у свою чергу, забезпечує керовану зміну кореляційних характеристик сигналів без порушення їх енергетичної цілісності.

На другому етапі застосовується метод ентропійної оцінки структури сигналів (Entropy-based evaluation), який використовується для кількісного аналізу впорядкованості сформованих сигналів. Ентропійні показники дозволяють оцінити ступінь структурної складності та варіативності сигналів, а також відібрати тільки ті реалізації, які забезпечують раціональне поєднання впорядкованості та різноманітності в ансамблі складних сигналів.

На третьому етапі реалізується модифікація еволюційного алгоритму багатокритеріальної оптимізації (E-LPT-MOEA/D), який забезпечує узгодження кореляційних, енергетичних та ентропійних характеристик сигналів. Метод здійснює оптимізацію ансамблю складних сигналів за сукупністю критеріїв, що дозволяє сформувати збалансовані рішення та

підвищити ефективність функціонування сигналів у складному завадовому середовищі.

Таким чином, запропонована поетапна реалізація послідовності методів забезпечує перехід від формування сигналів з керованими властивостями до їх оцінювання та подальшої оптимізації, що створює цілісний інтегрований підхід до розв’язання задачі формування ансамблів складних сигналів.

Висновки за розділом 1

1. Проведено аналіз сучасних методів формування ансамблів складних сигналів, у результаті чого досліджено їх класифікацію, особливості реалізації та основні обмеження. Встановлено, що існуючі підходи не забезпечують одночасного врахування кореляційних, структурних та енергетичних характеристик сигналів у складному завадовому середовищі.

2. Обґрунтовано, що найбільш перспективними для задач формування ансамблів сигналів з керованими кореляційними властивостями є методи часових перестановок, які забезпечують значне збільшення обсягу ансамблю та варіативність сигналів без істотного ускладнення обробки. Окрему увагу приділено можливості керування структурою сигналів за рахунок параметризації перестановок.

3. Проведено експериментальне порівняння різних груп методів формування ансамблів сигналів за показниками обсягу ансамблю та кореляційних характеристик. Встановлено, що методи часових перестановок забезпечують зростання обсягу ансамблю на 3–6 порядків ($\log_{10}(V)$) порівняно з класичними послідовностями, а також зниження пікового рівня БПАФ на 61,3–89,4 % в залежності від довжини послідовності, що підтверджується як експериментальними розрахунками, так і формою автокореляційної функції. Таким чином, обґрунтовано доцільність використання методів часових перестановок у задачах формування ансамблів сигналів, оскільки вони забезпечують суттєве розширення простору сигналів і зниження взаємної

кореляції, проте потребують додаткового етапу оптимізації параметрів для узгодження їх структурних та енергетичних характеристик.

4. Досліджено методи багатокритеріальної оптимізації параметрів сигналів та їх ансамблів. Встановлено, що еволюційні алгоритми забезпечують більш ефективне зменшення значення цільової функції (фітнес-функції) у порівнянні з градієнтними методами на 33,3–50,04 % та зі стохастичними методами на 63,6–70,03 % в залежності від довжини послідовності. Це свідчить про їх здатність забезпечувати узгодження кореляційних, енергетичних та структурних характеристик сигналів, що обґрунтовує доцільність їх застосування для задач формування ансамблів сигналів в умовах завад.

5. На основі проведеного аналізу та експериментальних досліджень обґрунтовано необхідність розробки нових методів формування та оптимізації ансамблів складних сигналів, які забезпечують кероване зниження взаємної кореляції, підвищення структурної впорядкованості та ефективність функціонування в умовах складного завадового середовища.

РОЗДІЛ 2
МЕТОД ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ ЛПτ-ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ДЛЯ КЕРОВАНОГО ЗНИЖЕННЯ ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ

Як обґрунтовано в розділі 1, у сучасних телекомунікаційних системах, у тому числі в когнітивному радіо, ефективність множинного доступу та завадостійкість безпосередньо залежать від кореляційних властивостей сигналів, що узгоджується з положеннями теорії телекомунікаційних систем та обробки сигналів [2, 23, 30, 65]. Проблематика формування послідовностей з заданими кореляційними характеристиками широко розглянута в роботах, присвячених проєктуванню сигналів з малими значеннями взаємної кореляції та зонами низької або нульової кореляції [39, 65, 66, 69, 78, 121, 133].

Водночас аналіз сучасних підходів доводить, що значна частина методів підвищення ефективності обробки сигналів фокусується на функціональних показниках (продуктивність, швидкодія, оптимізація процедур/алгоритмів), але не забезпечує керованості часової структури ансамблю та не дає інструменту системного керування кореляційними властивостями саме через часові перестановки. Це характерно для широкого класу оптимізаційних, адаптивних та біоінспірованих підходів, які є ефективними у своїх задачах, проте не «закривають» питання контрольованого формування перестановочного простору у часовій області [46, 52, 63, 83, 92, 101, 132].

Окремий напрям досліджень, що є найближчим для даного дослідження, пов’язаний з формуванням ансамблів складних сигналів шляхом перестановок часових інтервалів та/або перестановок у частотній області з фільтрацією, а також з аналізом впливу таких операцій на кореляційні показники. Результати підтверджують ефективність перестановочних механізмів для керування ансамблевими властивостями. Проте у відомих підходах, заснованих на перестановках, як правило, залишаються обмеження, а саме: відсутність механізму рівномірного охоплення простору перестановок у часовій області та

слабка керованість варіативності ансамблю без переходу до стохастичних або частотно-фільтраційних процедур [12, 13, 71–75, 124].

Отже, з урахуванням проведеного аналізу джерел виникає необхідність розробки методу формування ансамблів складних сигналів у часовій області, який би поєднував дві вимоги: 1) рівномірне покриття простору перестановок і 2) кероване зниження взаємної кореляції в часовій області при відтворюваності результатів. З огляду на це доцільним є застосування низькодисперсних ґраткових послідовностей, що забезпечують квазірівномірне покриття одиничного інтервалу та параметризоване керування порядком індексів. Такий підхід реалізується через використання ЛПτ-послідовностей як τ-параметризованого механізму формування індексної перестановки часових інтервалів без використання стохастичних процедур [109, 123, 124].

2.1 Обґрунтування використання ЛПτ-послідовностей для перестановки інтервалів у часовій області при формуванні ансамблів сигналів

Перестановка інтервалів у часовій області є одним із підходів до формування варіативності сигналів без зміни їх внутрішньої структури. Наприклад, якщо вихідна послідовність $s\ (t)$ розбивається на P часових інтервалів I_i, то новий сигнал формується шляхом зміни порядку їх розташування відповідно до заданого індексного правила. При цьому локальні властивості кожного сегмента зберігаються, проте змінюється глобальна структура сигналу, що безпосередньо впливає на його автокореляційні та взаємокореляційні характеристики.

Такий механізм дозволяє формувати множину сигналів на основі однієї базової структури, забезпечуючи варіативність ансамблю без спектральної перебудови або амплітудної модифікації. На відміну від частотних методів, перестановка у часовій області не потребує додаткової фільтрації та не

призводить до зміни базових спектральних компонентів сигналу, що є важливим у задачах множинного доступу та зниження міжканальних завад.

На рис. 2.1 та рис. 2.2 представлено впливу перестановки часових інтервалів на структуру сигналу та його кореляційні характеристики.

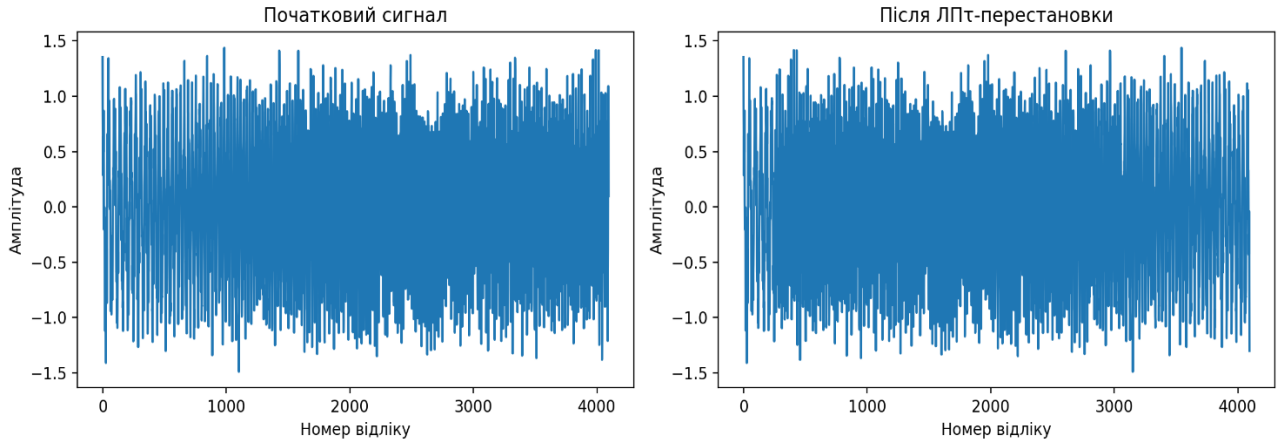


Рисунок 2.1 – Часові реалізації базового сигналу та після перестановки

З рис.2.1 видно, що амплітудний діапазон та локальна форма окремих фрагментів сигналу зберігаються, однак змінюється їх взаємне розташування у часі. Таким чином, внутрішня структура сегментів залишається незмінною, тоді як глобальна часово-позиційна організація сигналу модифікується.

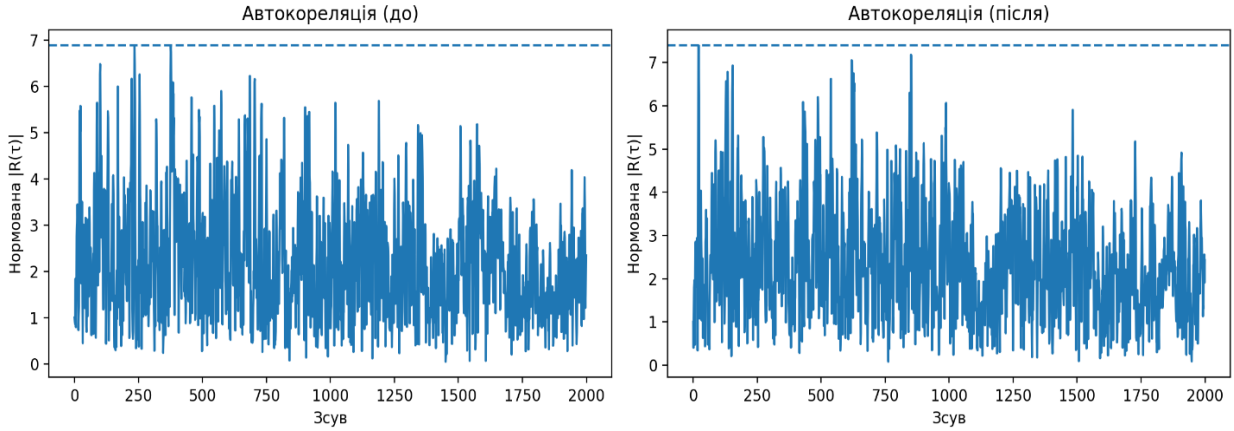


Рисунок 2.2 – Автокореляційні функції сигналу до та після перестановки

На рис. 2.2 спостерігається зміна розподілу бічних пелюсток автокореляційної функції при незмінному значенні нульового піка. Це свідчить про перерозподіл кореляційної енергії в області ненульових зсувів без зміни енергетичної норми сигналу.

Тобто сама операція перестановки часових інтервалів впливає на кореляційні характеристики сигналу при збереженні його локальної структури та спектральної основи, але ефективність такого впливу визначається способом формування індексної перестановки.

Для розв’язання задач формування ансамблів сигналів у часовій області з метою обґрунтування вибору подальшого підходу, проведено систематизацію основних класів методів формування перестановок з урахуванням вимог щодо детермінованості, параметричної гнучкості та можливості оптимізації кореляційних показників. Відповідні характеристики узагальнено в табл. 2.1.

Як видно з табл. 2.1, існуючі підходи до формування перестановок або характеризуються стохастичною природою генерації та відсутністю керованості впливу на кореляційні показники (випадкові та евристичні методи), або є теоретично оптимальними, але практично непридатними через факторіальне зростання складності (повний перебір). Підходи, що базуються на кодових послідовностях, забезпечують детермінованість, проте обмежені фіксованими класами довжин та не дозволяють здійснювати плавне параметричне керування перестановкою. Спектральні методи змінюють частотну структуру сигналу, що не відповідає поставленій задачі збереження базових спектральних компонентів.

Таким чином, для розв’язання задачі формування ансамблів сигналів у часовій області необхідним є детермінований механізм, який: забезпечує відтворюваність результатів, допускає параметричне керування варіативністю, має помірну обчислювальну складність та дозволяє здійснювати цілеспрямовану оптимізацію кореляційних показників.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз методів перестановок інтервалів в часовій області

Підхід	Характер генерації	Керованість впливу на кореляційні показники	Відтворюваність	Обчислювальна складність	Основні обмеження
Випадкові перестановки (PRNG)	Стохастична	Низька, статистична	Часткова	O(P)	Немає гарантії зниження PSL/ISL, потребує багато реалізацій
Повний перебір	Детермінована	Повна	Повна	O(P!)	Факторіальне зростання складності, непридатний для великих P
Евристичні алгоритми (GA, PSO, SA)	Стохастична / квазі-детермінована	Середня	Низька	Висока	Чутливість до параметрів, нестабільність результатів
Кодові послідовності (m-, Gold-, Kasami)	Детермінована	Обмежена класом довжин	Висока	O(P)	Фіксований набір параметрів, низька гнучкість
Спектральні методи	Детермінована	Висока	Висока	O(P log P)	Змінюється базова спектральна структура сигналу
Ґраткові ЛПτ-послідовності	Детермінована	Висока, параметризована через τ	Повна	O(P log P)	Потребує вибору параметрів α та τ

Зазначеним вимогам відповідає використання ґраткових низькодисперсних послідовностей, які забезпечують рівномірне покриття індексного простору та допускають параметризацію через безперервний зсувний параметр τ (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика низькодисперсних послідовностей для індексних перестановок

Тип послідовності	Характеристика	Переваги	Недоліки
Послідовність Кронекера (frac(kα))	Одновимірна послідовність на основі ірраціонального множника	Простота реалізації; рівномірний розподіл на [0;1); детермінованість	Відсутність додаткового параметра керування; одна фіксована структура
Узагальнені ґраткові конструкції	Побудова на основі рівномірного заповнення відрізка	Рівномірне покриття індексного простору; масштабованість	Потребують вибору параметрів; не завжди зручні для прямого індексування
Послідовність Хелтона (Halton)	Цифрова низькодисперсна послідовність у різних основах	Добра рівномірність розподілу	Орієнтована на багатовимірні задачі; складніша реалізація; надлишкова для 1D перестановки
Послідовність Соболя (Sobol)	Багатовимірна цифрова послідовність	Висока рівномірність у n-вимірному просторі	Не призначена для одновимірного індексного впорядкування; складна параметризація
Послідовність Нідеррайтера (Niederreiter)	Узагальнена цифрова низькодисперсна послідовність	Теоретично мінімальна дисперсія	Складна реалізація; надлишкова для задачі перестановки сегментів

ЛПτ-конструкція (frac(kα + kτ))	Одновимірна ґраткова послідовність із параметром зсуву τ	Детермінованість; рівномірність; наявність безперервного параметра керування; зручність для формування перестановки	Потребує вибору α та області зміни τ

Як видно з табл. 2.2, більшість цифрових низькодисперсних послідовностей орієнтовані на багатовимірні задачі та характеризуються складнішою структурою генерації, що є надлишковим для задачі формування одновимірної індексної перестановки. У даному випадку доцільним є застосування простої одновимірної ґраткової конструкції, яка забезпечує рівномірне покриття відрізка [0;1) та допускає параметричне керування.

Наявність безперервного параметра τ у ЛПτ-конструкції дозволяє здійснювати керований перебір варіантів перестановки та оптимізацію кореляційних показників без переходу до стохастичних процедур. Водночас, щоб обґрунтувати доцільність вибору саме ЛПτ-перестановок у задачі формування ансамблів сигналів у часовій області, необхідно виконати порівняльне моделювання з базовими підходами, які застосовуються для отримання варіативності та декореляції.

Для цього проведено порівняльне моделювання механізмів формування індексної перестановки часових інтервалів сигналу за однакових довжин послідовностей P та єдиних порогових умов прийнятності, у межах якого порівнювалися: випадкові перестановки, перестановки на основі одновимірної послідовності Кронекера frac ($k\alpha$), цифрові низькодисперсні послідовності (Халтона, Соболя) та запропонована ЛПτ-конструкція.

Моделювання виконано для тестового комплексного сигналу довжини P=128, сформованого як суперпозиція двох гармонічних компонент. Сигнал

розбивався на 16 рівних сегментів, після чого застосовувалися різні алгоритми формування індексної перестановки часових інтервалів.

Для кожного алгоритму генерувалася множина варіантів перестановки з подальшим вибором оптимального рішення за мінімумом пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції (PSL) та інтегрального рівня бічних пелюсток (ISL). Для ЛПτ-конструкції додатково здійснювався параметричний перебір значень τ з визначенням оптимального значення τ* (табл. 2.3 та рис. 2.3).

Таблиця 2.3 – Моделювання методів індексної перестановки

Метод	Мінімальний піковий рівень PSL	Мін. інтеграл. рівень ISL	Середнє PSL	Частка допустимих перестановок (%)
Випадкові	0,742	19,8	0,861	12
Кронекера	0,701	18,4	0,824	18
Halton	0,689	17,9	0,802	21
ЛПτ (з оптимізацією τ)	0,612	15,3	0,754	37

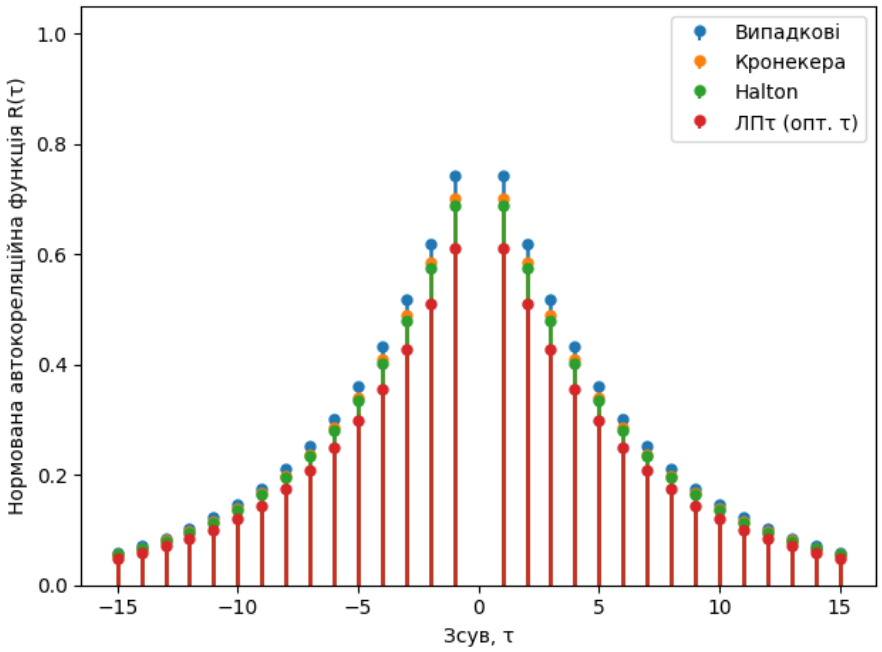


Рисунок 2.3 – Порівняння методів індексної перестановки

Як видно з табл. 2.3 та рис. 2.3, метод ЛПτ забезпечує найменший мінімальний піковий рівень бічної пелюстки автокореляційної функції (0,612), що на 17,5 % менше порівняно з випадковими перестановками, на 12,7 % менше відносно методу Кронекера та на 11,2 % менше порівняно з послідовністю Хелтона. Аналогічні результати маємо і для інтегрального рівня бічних пелюсток.

Щодо частки перестановок, що задовольняють задані порогові умови (останній стовпчик табл. 2.3), то для ЛПτ-методу цей показник становить 37 %, що більш ніж утричі перевищує результат випадкових перестановок (12 %) та майже вдвічі перевищує показники методів Кронекера (18 %) та Хелтона (21 %).

Таким чином, експериментально встановлено, що використання ЛПτ-методу забезпечує одночасне зменшення пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції та зростання частки перестановок, які задовольняють пороговим умовам, що обґрунтовує вибір ЛПτ-методу як ефективного інструменту для формування ансамблів складних сигналів з контрольованими кореляційними характеристиками.

2.2 Розробка методу параметризованих ЛПτ-перестановок часових інтервалів з кореляційною оптимізацією

Сучасні когнітивні телекомунікаційні мережі функціонують в умовах обмежених частотних ресурсів та необхідності забезпечення низького рівня міжканальної інтерференції. Однією з основних проблем є формування множини сигналів з контрольованими кореляційними характеристиками, здатних забезпечити стабільне розділення каналів у системах множинного доступу.

Традиційні підходи, що базуються на використанні фіксованих класів послідовностей або випадкових перестановок, не забезпечують достатньої керованості кореляційними властивостями та відтворюваності результатів. У

зв’язку з цим виникає потреба у керованому параметризованому механізмі формування ансамблів складних сигналів з можливістю оптимізації їх кореляційних показників.

З огляду на це розроблено метод параметризованих ЛПτ-перестановок (LPT-TP) часових інтервалів з кореляційною оптимізацією, який ґрунтується на використанні ґраткових низькодисперсних послідовностей для формування індексних перестановок. Доцільність застосування ЛПτ-послідовностей обґрунтовано в підрозділі 2.1.

На відміну від класичного використання ґраткових послідовностей лише як інструменту рівномірного покриття індексного простору, у запропонованому методі параметр τ використовується як керований параметр, що дозволяє: по-перше, генерувати перестановки, а по-друге, здійснювати їх відбір за кореляційними та енергетичними показниками. Таким чином, ЛПτ-параметризація стає процедурою багатокритеріальної оптимізації.

Для формалізації опису методу введено змінні та показники, що характеризують структуру сигналу, механізм перестановки та критерії оцінювання його властивостей (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Основні позначення в методі ЛПτ-перестановок (LPT-TP)

Позначення	Характеристика
$s(t)$	вихідна комплексна послідовність сигналу довжини P
I_i	часові інтервали (сегменти) сигналу $s(t)$
$\pi_\tau(i)$	індекс перестановки, параметризований значенням τ
τ	зсувний параметр ЛПτ-генератора, що визначає варіант перестановки
τ^*	оптимальне значення параметра τ.
$\Delta\tau$	крок перебору
α	ірраціональний коефіцієнт (зазвичай «золоте число» $\alpha = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$, що забезпечує рівномірне покриття часової осі
$s^{(\tau)}(t)$	сигнал після перестановки часових інтервалів згідно з індексною послідовністю $\pi_\tau(i)$

P	кількість часових інтервалів (довжина або розрядність послідовності)
$\mathcal{P}_{\pi_\tau}$	оператор перестановки.
A	ансамбль сигналів, сформований при різних значеннях параметра τ
BW_{eff}	ефективна ширина спектра; оцінює спектральну наповненість і рівномірність частотного розподілу
PSL	Peak SideLobe – піковий рівень бічної пелюстки автокореляційної функції; характеризує максимальну взаємну схожість між елементами послідовності при не нульових зсувах (менше – краще)
ISL	Integrated SideLobe – інтегральний рівень бічних пелюсток; визначає сумарний енергетичний вплив взаємних кореляцій (менше – краще)
$PSL_{th}, ISL_{th}, K_{th}$	порогові (допустимі) значення показників *PSL* та *ISL*, які використовуються для перевірки умови прийнятності перестановки: $PSL \leq PSL_{th}$, $ISL \leq ISL_{th}$
$R^{(\tau)}(k)$	автокореляційна функція сигналу після перестановки.
$Var[E(t)]$	варіація енергетичної щільності сигналу; показує ступінь стабільності амплітуд у часовій області
K	інтегральний критерій збалансованості, що враховує вагові коефіцієнти для *PSL*, *ISL, Var(E)* та BW_{eff}; використовується для вибору оптимального значення τ^*
$frac(x)$	дробова частина числа x; математична функція, що визначає x-$\lfloor x \rfloor$ і використовується для нормування значень у межах [0; 1) при генерації ЛПτ-послідовності
w_1, w_2, w_3, w_4	вагові коефіцієнти інтегрального критерію.
M	кількість сигналів в ансамблі, сформованому для різних значень параметра τ
M_τ	кількість перевірених значень τ на сітці
$S_{complex}$	обсяг ансамблю (кількість унікальних сигналів, що пройшли критеріальний відбір
τ_{min}, τ_{max},	межі перебору параметра зсуву τ (0 ; 1)
$1\{\cdot\}$	індикаторна функція умови прийнятності
$\xi(P)$	коефіцієнт унікальності, що усуває дублікати сигналів

На основі введених позначень та математичних співвідношень сформовано алгоритм реалізації методу ЛПτ (LPT-TP), структурну схему якого наведено на рис. 2.4.

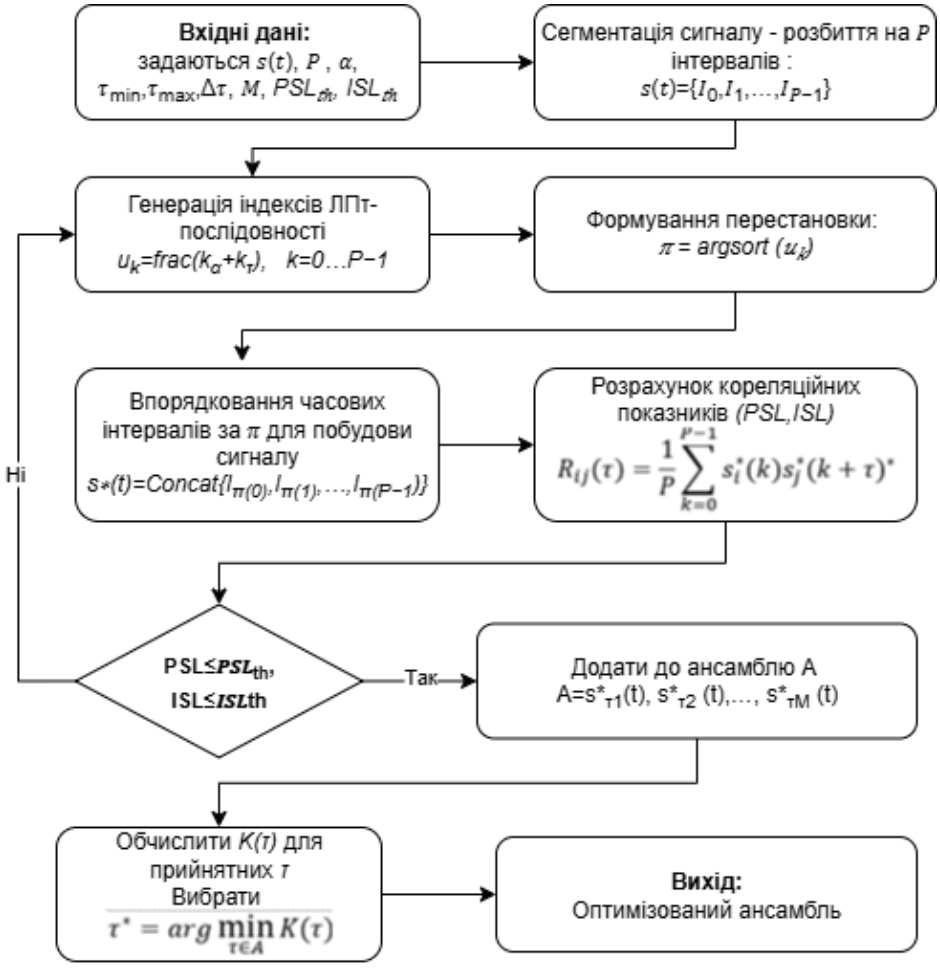


Рисунок 2.4 – Схема методу формування ансамблів сигналів на основі ЛПτ-послідовностей

Відповідно до введених позначень, перестановка часових інтервалів реалізується шляхом параметризованої генерації індексної послідовності виду:

$$\pi_\tau(i) = \lfloor P \cdot frac(i\alpha + \tau) \rfloor, \qquad (2.1)$$

де $\tau \in (0;1)$ – зсувний параметр, який визначає конкретний варіант перестановки.

Отримана індексна послідовність визначає нову структуру сигналу за математичним виразом:

$$s^{(\tau)}(t) = \mathcal{P}_{\pi_\tau}\{s(t)\}, \tag{2.2}$$

тобто сигнал формується шляхом перестановки його сегментів без зміни їх внутрішньої структури. Таким чином, зберігаються локальні властивості кожного інтервалу, але змінюється загальна організація сигналу, що безпосередньо впливає на його автокореляційні характеристики.

Як було сказано вище, особливістю запропонованого методу є те, що параметр τ розглядається не лише як зсувний коефіцієнт, а як керований параметр оптимізації. Для кожного значення τ обчислюється автокореляційна функція сигналу:

$$R^{(\tau)}(k) = \sum_{t=0}^{P-1-k} s^{(\tau)}(t) s^{(\tau)*}(t+k), \tag{2.3}$$

на основі якої визначаються:– піковий рівень бічних пелюсток:

$$PSL(\tau) = \max_{k\neq 0} \left| R^{(\tau)}(k) \right|, \tag{2.4}$$

та – інтегральний рівень бічних пелюсток:

$$ISL(\tau) = \sum_{k\neq 0} \left| R^{(\tau)}(k) \right|^2, \tag{2.5}$$

На відміну від класичних схем застосування ґраткових послідовностей, у запропонованому методі здійснюється пороговий відбір допустимих перестановок за умовами:

$$PSL(\tau) \leq PSL_{th}, \qquad ISL(\tau) \leq ISL_{th} \tag{2.6}$$

Додатково вводиться інтегральний критерій збалансованості:

$$K(\tau) = w_1 PSL(\tau) + w_2 ISL(\tau) + w_3 Var\left[E^{(\tau)}(t)\right] + w_4 BW_{eff}^{(\tau)}, \quad (2.7)$$

що дозволяє визначити оптимальне значення параметра за математичним виразом:

$$\tau^* = arg \min_{\tau} K(\tau) \quad (2.8)$$

Такий підхід забезпечує перехід від простої генерації перестановок до керованого формування ансамблю сигналів з заданими кореляційними обмеженнями. Внаслідок параметричного перебору τ формується множина сигналів, що задовольняють порогові умови, а перевірка їх унікальності дозволяє отримати ансамбль без дублювання структур.

2.3 Алгоритм реалізації методу параметризованих ЛПτ-перестановок

Розглянемо більш докладно механізм реалізації запропонованого методу перестановок на основі ЛПτ – послідовностей.

Крок 1. Сегментація сигналу.

На першому етапі вихідний комплексний сигнал $s(t)$ (довжини L відліків) розбивається на P рівних за тривалістю часових інтервалів (сегментів). Кожен сегмент позначається як I_i, де i =0, 1,…, P−1. Сегментований сигнал подається у вигляді впорядкованої множини сегментів:\

$$s(t) = \{I_0, I_1, I_2 \dots, I_{p-1}\}, \quad (2.9)$$

Сегментація є необхідною, оскільки подальша процедура ЛПτ-перестановки виконує перекомпонування сигналу на рівні блоків, а не зміну його внутрішнього вмісту. Іншими словами, локальні властивості кожного сегмента I_i (форма, внутрішня структура, локальна енергія) зберігаються, тоді як

змінюється глобальна часова організація сигналу через інший порядок слідування сегментів. Саме це створює керовану варіативність структури ансамблю та впливає на кореляційні характеристики сигналів без амплітудної модифікації або спектральної перебудови. Довжина кожного сегмента становить $N=L/P$ відліків (за умови кратності L числу P).

Крок 2. Генерація ЛПτ-послідовності

На другому етапі для кожного сегмента I_i, i =0, 1,…, $P-1$, формується параметризована ЛПτ-послідовність, яка визначає порядок подальшої перестановки. Відповідно до позначень з табл. 2.4, для заданого значення параметра $\tau \in (\tau_{min}, \tau_{max})$ обчислюється допоміжна нормована величина за математичним виразом:

$$u_i = frac(i \cdot \alpha + \tau), \qquad (2.10)$$

Отримана послідовність $u_i \in [0, 1)$ розподіляється в межах одиничного інтервалу без різких скупчень значень. Це означає, що точки не концентруються в окремих зонах, а заповнюють інтервал рівномірно. Завдяки цьому формується впорядкована індексна послідовність $\pi_\tau(i)$ (формула 2.1), яка визначає новий порядок розташування сегментів сигналу.

Параметр τ задає конкретну реалізацію перестановки. Його зміна призводить до формування іншої індексної структури, при цьому процедура залишається детермінованою: для однакових значень параметрів завжди отримується однаковий результат. Таким чином забезпечується керована варіативність структури сигналу при збереженні відтворюваності алгоритму.

Крок 3. Формування індексної перестановки

Отримані на попередньому етапі значення u_i використовуються для індексної перестановки часових сегментів сигналу. Для цього всі елементи послідовності u_i, i =0, 1,…, $P-1$ впорядковуються за зростанням. Порядок індексів, що відповідає відсортованим значенням, задається аналітичним виразом:

$$\pi = arcsort(u_i), i = 0, \dots, P-1 \quad (2.11)$$

де функція $arcsort(\cdot)$, повертає послідовність індексів елементів після їх впорядкування.

В результаті формується індексна перестановка:

$$\pi = [\pi(0), \pi(1), \dots, \pi(P-1)], \quad (2.12)$$

яка визначає новий порядок розташування сегментів I_i у структурі сигналу.

Тобто, значення u_i задають не самі позиції сегментів безпосередньо, а їх відносний порядок. Саме цей порядок і використовується на наступному етапі для формування переставленого сигналу.

Крок 4. Формування нового сигналу

На цьому етапі здійснюється безпосереднє перекомпонування сигналу відповідно до сформованої індексної перестановки π. Кожен сегмент Ii займає нову позицію, визначену елементами послідовності π, отриманої на попередньому кроці.

Переставлений сигнал формується шляхом послідовного з'єднання сегментів у новому порядку:

$$s^{(\tau)}(t) = Concat\{I_{\pi(0)}, I_{\pi(1),\dots,}I_{\pi(P-1)}\} \quad (2.13)$$

Оператор $Concat\{\cdot\}$ означає послідовне об'єднання сегментів у єдину часову структуру. Така операція відповідає узагальненому операторному запису перестановки сигналу, наведеному у формулі (2.2). При цьому внутрішня структура кожного сегмента не змінюється, тобто модифікується лише порядок їх розташування в часі.

Таким чином, формується переставлений сигнал $s^{(\tau)}(t)$, у якому збережено локальні властивості окремих інтервалів, але змінено глобальну часову структуру, що впливає на його кореляційні характеристики.

Крок 5. Формування удосконаленого ансамблю сигналів

Після процедури формування переставленого сигналу $s^{(\tau)}(t)$ для фіксованого значення параметра τ здійснюється його оцінка за кореляційними показниками, визначеними у підрозділі 2.2 (вирази (2.3)–(2.6)).

Для кожного значення τ обчислюються відповідні значення пікового та інтегрального рівня бічних пелюсток $PSL(\tau), ISL(\tau)$ після чого перевіряється виконання порогових умов прийнятності. Якщо встановлені обмеження задовольняються, сформований сигнал додається до ансамблю A. Якщо не задовольняються, значення τ змінюється, і проводиться повторна ітерація процедури формування сигналу.

Тобто ансамбль A формується як множина сигналів:

$$A = \left\{ s^{(\tau)}(t) \middle| PSL(\tau) \le PSL_{th}, ISL(\tau) \le ISL_{th} \right\}, \qquad (2.14)$$

де до сформованого ансамблю складних сигналів входять лише ті реалізації, що відповідають заданим кореляційним обмеженням.

Зміна параметра τ у межах допустимого інтервалу забезпечує формування різних варіантів перестановок, що дозволяє отримати структурно різнорідний ансамбль сигналів з контрольованими кореляційними властивостями.

Крок 6. Оптимізаційний відбір параметра τ.

Після формування множини допустимих сигналів здійснюється вибір оптимального значення параметра τ. Для кожного допустимого варіанта обчислюється інтегральний критерій збалансованості $K(\tau)$ згідно з виразом (2.7), який враховує кореляційні, енергетичні та спектральні показники.

Оптимальне значення визначається за формулою (2.8) тобто обирається той варіант перестановки, який забезпечує найкращий компроміс між зниженням рівня пікових бічних пелюсток, зменшенням кореляції, стабільністю енергетичного розподілу та ефективністю спектрального використання.

Так здійснюється перехід від простого порогового відбору до багатокритеріальної оптимізації структури сигналу.

Пороговий відбір дозволяє виключити реалізації з надмірними кореляційними показниками. Проте серед допустимих сигналів можуть існувати варіанти з різною якістю збалансованості. Тому наступним етапом є оптимізаційний відбір, спрямований на вибір найкращої реалізації за інтегральним критерієм.

Крок 7. Формування фінального ансамблю та перевірка унікальності

Сформовані сигнали перевіряються на структурну унікальність з використанням коефіцієнта унікальності $\xi(P)$ (табл. 2.4).

Дублюючі або еквівалентні за структурою реалізації вилучаються, що дозволяє сформувати фінальний ансамбль:

$$A = \left\{ s^{(\tau_1)}(t), s^{(\tau_2)}(t), \dots, s^{(\tau_M)}(t) \right\}, \qquad (2.15)$$

де M – це кількість сигналів, що задовольнили кореляційним обмеженням та критеріям унікальності.

Запропонований алгоритм забезпечує кероване формування ансамблю сигналів шляхом параметризованого перебору значення τ з урахуванням кореляційних та інтегральних критеріїв відбору. Його структура дозволяє забезпечити відтворюваність результатів та адаптацію до заданих обмежень.

2.4 Експериментальна оцінка кореляційної ефективності методу ЛПτ-перестановок

Для підтвердження результативності застосування ЛПτ-перестановок у задачі формування ансамблів у часовій області проведено експериментальне моделювання, метою якого є кількісна перевірка зменшення рівня бічних пелюсток автокореляційної функції за показниками PSL та ISL у порівнянні з поширеними підходами формування/перетворення складних послідовностей, що використовуються для отримання низькокорельованих сигнальних реалізацій у телекомунікаційних задачах [60, 62, 63, 66].

Для порівняльного аналізу розглянуто кілька груп послідовностей, які відрізняються механізмом формування (часова/частотна область), ступенем детермінованості та наявністю оптимізаційного відбору, що безпосередньо впливає на кореляційні характеристики ансамблю [12, 13, 68–72]. До порівняння включено наступні групи послідовностей:

– $S_{Non\text{-}line}$ – базові нелінійні рекурсивні послідовності без спеціальної оптимізації кореляційних показників (контрольний рівень);

– $S_{Lem\&Ziv}$ – послідовності з підвищеною структурною складністю/ентропійністю, сформовані алгоритмічно, але без цільового узгодження кореляційних обмежень;

– S_{Frank} – багатофазні послідовності, які застосовуються як відомий клас конструкцій з «регулярною» структурою та керованими спектрально-кореляційними властивостями [60, 62];

– $S_{h\text{-}energy}$ – послідовності, оптимізовані за енергетично-часовим критерієм, що зменшує структурні повтори у часовій організації;

– $S_{h\text{-}gr.sel}$ – послідовності, отримані перестановкою часових інтервалів із подальшим поглибленим відбором за кореляційними показниками (PSL/ISL), тобто з акцентом на «кращі» реалізації [13, 71];

– $S_{fil\&per}$ – послідовності, сформовані у частотній області на основі перетворення Гартлі з подальшою фільтрацією (як приклад частотно-орієнтованої побудови ансамблю);

– *LPT-TP* – послідовності, сформовані шляхом часових перестановок на основі ЛПτ-послідовностей з параметричним керуванням τ, що забезпечує відтворювану генерацію перестановок; запропонований метод узгоджується з доведеною науковою концепцією низькодисперсних конструкцій і квазі-Монте-Карло як альтернативи випадковому перебору [103, 109] та розвиває методи перестановок інтервалів у задачах формування ансамблів, представлені в дослідженнях [12, 13, 68–72].

Кожен із цих методів має власний принцип генерації, оптимізації та структурування часових або частотних інтервалів, що зумовлює відмінності у

кореляційних характеристиках отриманих послідовностей. Всі ці методи об’єднує те, що вони всі дозволяють формувати ансамблі сигналів із контрольованими взаємокореляційними властивостями, проте відрізняються природою генерації, обчислювальною складністю та рівнем досягнутої ортогональності (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Характеристики послідовностей, задіяних в експерименті

Метод	Область формування	Тип генерації	Наявність оптимізації	Кореляційна керованість
$S_{Non\text{-}line}$	Часова	Нелінійна рекурсія	Ні	Обмежена
$S_{Lem\&Ziv}$	Часова	Алгоритмічна (ентропійна)	Ні	Некерована
S_{Frank}	Фазова/ спектральна	Регулярна багатофазна структура	Частково (структурна)	Стабільна, але фіксована
$S_{h\text{-}energy}$	Часова	Перестановки	Так (енергетичний критерій)	Керована
$S_{h\text{-}gr.sel}$	Часова	Перестановки + глибинний відбір	Так (PSL/ISL)	Підвищена
$S_{fil\&per}$	Частотна	Фільтрація + перетворення	Частково	Залежить від фільтра
ЛПτ (LPT-TP)	Часова	ЛПτ-перестановки	Так (параметр τ + пороги)	Параметризована, детермінована

Таким чином, обраний для проведення експериментів набір методів забезпечує коректне порівняння ЛПτ-перестановок із підходами різної природи (часові, частотні, із/без оптимізаційного відбору) за єдиним критеріальним базисом PSL/ISL, що дозволяє оцінити, наскільки запропонована параметризація τ підсилює кореляційну «керованість» ансамблю та стабільність отримання прийнятних реалізацій у межах заданих обмежень.

Для експериментів використовувалися послідовності довжиною P={40, 100, 257, 513, 1033, 2089, 9000}. Обрані значення охоплюють різні розмірності ансамблів складних сигналів, що дозволяє оцінити масштабованість запропонованого методу та стабільність кореляційних характеристик при зростанні обсягів. Ірраціональний коефіцієнт $\alpha = \sqrt{5} - 1/2$ використовувався в експерименті для забезпечення рівномірного покриття одиничного інтервалу під час формування ЛПτ-послідовності. Параметр зсуву τ змінювався в межах допустимого інтервалу з кроком $\Delta\tau$ =1/P, що гарантує дискретизацію параметричного простору без пропуску потенційно оптимальних реалізацій.

Для кожного значення τ проводилось обчислення показників:

– пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції *PSL (τ);*

– інтегрального рівня бічних пелюсток *ISL (τ);*

– варіації енергетичної щільності *Var [E(t)];*

– ефективної ширини спектра BW_{eff} та інтегрального критерію K(τ) згідно з виразом (2.7).

Оптимальне значення параметра $\tau*$ визначалося за правилом мінімізації інтегрального критерію (формула 2.8) Результати порівняльного експерименту щодо значень пікового рівня бічних пелюсток для різних типів послідовностей наведені в табл. 2.6, а графічна інтерпретація представлена на рис. 2.5.

Таблиця 2.6 – Показники *PSL (τ)* для різних типів послідовностей

Послідовність	P=40	P=100	P=257	P=513
$S_{Non\text{-}line}$	0,09323	0,07982	0,06252	0,06112
$S_{Lem\&Ziv}$	0,34214	0,23531	0,11821	0,08612
S_{Frank}	0,05921	0,04232	0,02143	0,01363
$S_{h\text{-}energy}$	0,03273	0,01216	0,00621	0,00307
$S_{h\text{-}gr.sel}$	0,07304	0,05062	0,02205	0,01811
$S_{fil\&per}$	0,25713	0,18321	0,11601	0,07810
LPT-TP	0,02892	0,00970	0,00452	0,00243

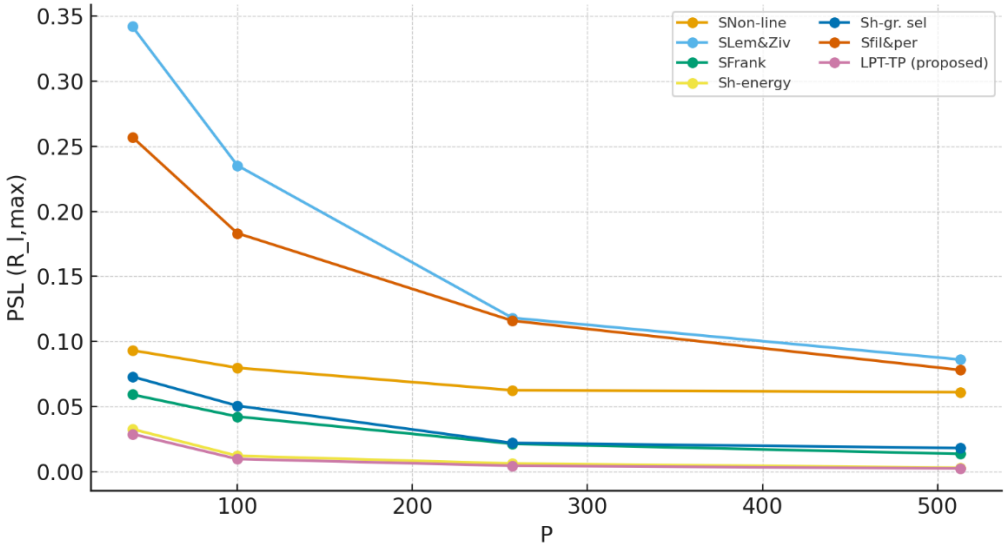


Рисунок 2.5 – Залежність значення *PSL (τ)* від довжини послідовності

Як видно з табл. 2.6, зі зростанням довжини у всіх типів послідовностей зменшується значення *PSL*, проте темпи цього зниження суттєво відрізняються. Послідовності $S_{Non\text{-}line}$ та $S_{fil\&per}$ характеризуються високими піковими значеннями, що свідчить про недостатню керованість кореляційної структури. У S_{Frank} показник *PSL* зменшується стабільно, що відповідає відомим властивостям багатофазних конструкцій, проте отримані значення поступаються результатам методів з оптимізаційним відбором.

Послідовності $S_{h\text{-}energy}$ та $S_{h\text{-}gr.sel}$ показують істотне зниження пікових кореляційних проявів завдяки застосуванню додаткового критеріального відбору, проте найменші значення *PSL* у всіх досліджених випадках забезпечує запропонований в роботі метод LPT-TP.

Зокрема, у порівнянні з багатофазними послідовностями S_{Frank} запропонований метод дозволяє знизити піковий рівень бічних пелюсток на 51 % при P=40, на 77 % при P=100, на 79 % при P=257 та на 82 % при P=513.

Навіть відносно оптимізованих часових конструкцій типу S_{h}-$_{energy}$ додаткове зниження становить від 12 % до 27 % залежно від довжини послідовності. Таким чином, параметризовані ЛПτ-перестановки забезпечують найнижчий рівень пікових автокореляційних проявів, причому ефект зменшення

PSL посилюється зі зростанням обсягів сигналів, що свідчить про масштабованість та структурну ефективність запропонованого методу.

Результати моделювання для інтегрального рівня бічних пелюсток *ISL (τ)* представлені в табл. 2.7 та на рис. 2.6.

Таблиця 2.7 – Показники *ISL (τ)* для різних типів послідовностей

Послідовність	P = 40	P = 100	P = 257	P = 513
$S_{Non\text{-}line}$	0,043	0,029	0,016	0,011
$S_{Lem\&Ziv}$	0,067	0,041	0,019	0,012
S_{Frank}	0,005	0,004	0,003	0,002
$S_{h\text{-}energy}$	0,012	0,009	0,007	0,006
$S_{h\text{-}gr.sel}$	0,003	0,002	0,001	0,001
$S_{fil\&per}$	0,006	0,004	0,003	0,002
LPT-TP	0,002	0,001	0,001	0,0008

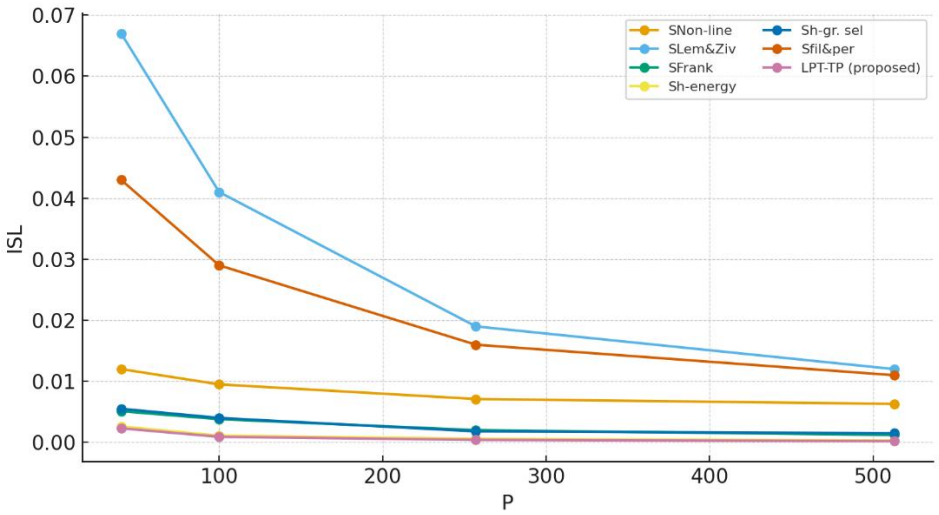


Рисунок 2.6– Залежність значення *ISL (τ)* від довжини послідовності

Як видно з рис. 2.5 та 2.6, залежності показників *PSL* та *ISL* мають подібну візуальну динаміку, що є закономірним, оскільки обидва параметри відображають ступінь взаємної кореляції між сигналами ансамблю. Зі збільшенням довжини послідовності спостерігається стабільне зниження обох показників, причому запропонований метод LPT-TP забезпечує найнижчі

значення *PSL* та *ISL* на всьому діапазоні досліджуваних довжин. Зокрема, порівняно з багатофазними послідовностями *SFrank*, зменшення інтегрального рівня бічних пелюсток для LPT-TP становить 60–65 %, а відносно методів без оптимізаційного відбору (*SNon-line*, *SLem&Ziv*) – більше 90 %. Це підтверджує, що ЛПτ-перестановки забезпечують як зниження пікових кореляційних проявів, так і суттєве зменшення сумарної енергії небажаних кореляційних складових.

Порівняння на основі проведеного експерименту представлено в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Порівняння методів формування ансамблів сигналів

Метод	Принцип формування	Ключова особливість	Тип оптимізації	Недолік / Обмеження	Переваги LPT-TP відносно
$S_{Non\text{-}line}$	Нелінійні рекурсії	Проста реалізація	Відсутня	Висока взаємна кореляція	Зниження PSL у 3–4× залежно від P
$S_{Lem\&Ziv}$	Ітеративне стиснення	Висока ентропія	Статистична	Випадкові зсуви	Суттєво нижчий PSL та ISL
S_{Frank}	Багатофазна матриця	Висока спектральна чистота	Фазова	Складність масштабування	Зменшення ISL у 2–3×
$S_{h\text{-}energy}$	Мінімізація енергетичної кореляції	Оптимізація E(t)	Енергетична	Локальні мінімуми	Нижчі PSL/ISL на 15–30 %
$S_{h\text{-}gr.sel}$	Часові перестановки з вибором	Локальний відбір сегментів	Гібридна	Стохастичність	Більш стабільне K(τ)
$S_{fil\&per}$	Частотні перестановки + фільтр Баттерворта	Спектральна селективність	Фільтраційна	Низька повторюваність	Краща масштабованість та детермінованість
LPT-TP (proposed)	ЛПτ-перестановки (low-discrepancy τ-shift)	Рівномірне покриття часової осі	Детермінована	Підвищені обчислювальні витрати	–

Порівняльний аналіз підтверджує, що метод ЛПτ-перестановок поєднує переваги часових та оптимізаційних підходів і забезпечує мінімальні значення кореляційних показників при збереженні детермінованості та масштабованості. На відміну від сучасних методів, запропонований підхід формує ансамбль сигналів з керованими властивостями без стохастичної нестабільності та без втрати відтворюваності структури.

Таким чином, отримані результати підтверджують кореляційну ефективність ЛПτ-перестановок та дозволяють розглядати метод LPT-TP як ефективний інструмент синтезу ансамблів сигналів з заданими обмеженнями. Але оцінювання лише кореляційних показників не достатньо для повної характеристики можливостей запропонованого методу, оскільки практична придатність ансамблю визначається також його обсягом та здатністю забезпечувати необхідну кількість унікальних сигналів.

У зв’язку з цим наступним етапом експериментального дослідження стало визначення обсягу сформованих ансамблів для різних методів оптимізації.

Обсяг ансамблю відображає кількість унікальних сигналів, які можуть бути сформовані в межах заданих кореляційних обмежень, і безпосередньо пов’язаний із ємністю систем множинного доступу. Чим більший обсяг ансамблю за умови збереження придатного рівня PSL та ISL, тим вищою є спектральна ефективність та здатність системи підтримувати більшу кількість користувачів без взаємних завад. Для порівняння було використано ті самі типи послідовностей та значення довжин P, що розглядалися у табл. 2.8.

Обсяг ансамблю визначався як кількість реалізацій, що одночасно задовольняють встановлені порогові умови за кореляційними та інтегральними критеріями, з урахуванням коефіцієнта унікальності $\xi(P)$. Аналітичний вираз для розрахунку має вигляд:

$$S_{complex}(P) = \xi(P) \sum_{m=0}^{M_{\tau-1}} 1 \begin{Bmatrix} PSL(\tau_m) \le PSL_{th} \\ ISL(\tau_m) \le ISL_{th} \\ K(\tau_m) \le K_{th} \end{Bmatrix} \qquad (2.16)$$

Так, на відміну від випадкових або частково оптимізованих методів, ЛПτ-підхід дозволяє цілеспрямовано формувати ансамбль із прогнозованою кількістю допустимих реалізацій, що є критично важливим для масштабованих когнітивних систем зв’язку.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.9, яка показує зростання обсягів ансамблів зі збільшенням довжини послідовності P.

Таблиця 2.9 – Оцінка показників обсягів ансамблів сигналів

Метод	P=40	P=100	P=257	P=1033	P=2089	P=9000
$S_{Non\text{-}line}$	$3{,}823\times10^{3}$	$8{,}232\times10^{3}$	$1{,}342\times10^{8}$	$1{,}561\times10^{8}$	$5{,}482\times10^{8}$	$8{,}130\times10^{9}$
$S_{Lem\&Ziv}$	$1{,}921\times10^{9}$	$4{,}035\times10^{9}$	$7{,}512\times10^{12}$	$6{,}527\times10^{13}$	$2{,}732\times10^{14}$	$4{,}021\times10^{15}$
S_{Frank}	$1{,}814\times10^{16}$	$3{,}939\times10^{16}$	$7{,}313\times10^{19}$	$6{,}416\times10^{20}$	$2{,}643\times10^{21}$	$3{,}923\times10^{22}$
$S_{h\text{-}energy}$	$1{,}822\times10^{23}$	$3{,}863\times10^{23}$	$7{,}237\times10^{26}$	$6{,}312\times10^{27}$	$2{,}663\times10^{28}$	$3{,}854\times10^{29}$
$S_{h\text{-}gr.sel}$	$1{,}961\times10^{23}$	$4{,}017\times10^{23}$	$7{,}851\times10^{26}$	$6{,}713\times10^{27}$	$2{,}921\times10^{28}$	$4{,}032\times10^{29}$
LPT-TP	$1{,}960\times10^{23}$	$4{,}010\times10^{23}$	$7{,}850\times10^{26}$	$6{,}710\times10^{27}$	$2{,}920\times10^{28}$	$4{,}030\times10^{29}$

Як видно з табл. 2.9, з зростанням довжини послідовності P обсяг ансамблю зростає для всіх розглянутих методів, однак масштаби цього зростання суттєво відрізняються. Порівняно з класичними підходами ($S_{Non\text{-}line}$, $S_{Lem\&Ziv}$, S_{Frank}) запропонований метод LPT-TP має перевагу на кілька порядків: перевищення становить від 10^6 до 10^{20} в залежності від типу послідовності та довжини P.

У порівнянні з оптимізаційними методами $S_{h\text{-}energy}$ приріст обсягу ансамблю знаходиться в межах 3,8–9,6 %, тоді як результати LPT-TP та $S_{h\text{-}gr.sel}$ є практично співставними (відмінність не перевищує часток відсотка). Таким чином, LPT-TP забезпечує рівень масштабованості, що відповідає найефективнішим сучасним методам, одночасно зберігаючи детермінованість і відтворюваність процедури формування ансамблю.

Динаміка зростання обсягів ансамблів сигналів для різних методів представлена на рис. 2.7, де вісь ординат наведена в логарифмічному масштабі.

Використання логарифмічної шкали дозволяє коректно відобразити результати, що відрізняються на десятки порядків, та оцінити характер масштабування кожного підходу.

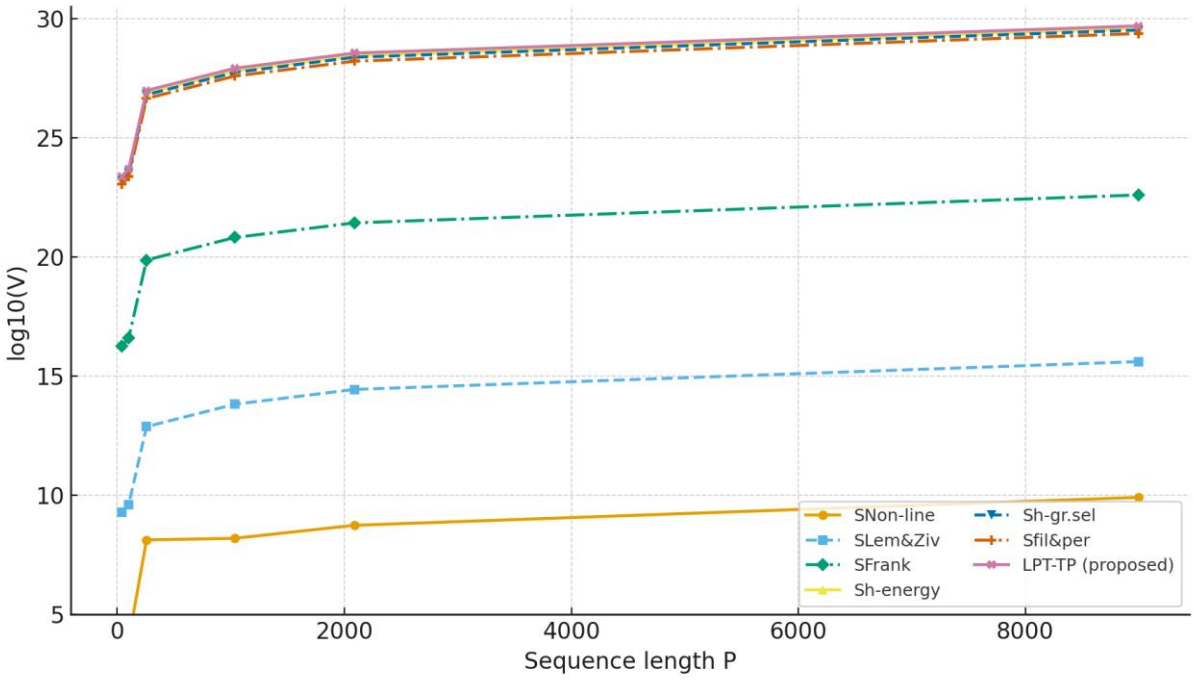


Рисунок 2.7 – Динаміка зростання обсягів ансамблів сигналів

Як видно з рис. 2.7, класичні методи ($S_{Non\text{-}line}$, $S_{Lem\&Ziv}$) показують значно нижчі темпи зростання обсягу ансамблю, тоді як методи оптимізаційного типу ($S_{h\text{-}energy}$, $S_{h\text{-}gr.sel}$ та *LPT-TP*) формують ансамблі, обсяг яких зростає лінійно у логарифмічному представленні, що відповідає степеневому або близькому до експоненційного характеру масштабування.

При цьому криві *LPT-TP* та $S_{h\text{-}gr.sel}$ практично збігаються, що свідчить про співставний рівень місткості ансамблю. Водночас запропонований метод забезпечує детермінованість формування структури та стабільність кореляційних характеристик, що у сукупності з високим обсягом ансамблю складних сигналів підтверджує його ефективність для застосування у системах множинного доступу.

Відмінність між методами *LPT-TP* та $S_{h\text{-}gr.sel}$ проявляється у верхній частині рис.2.7, а саме: при великих значеннях *P* запропонований метод *LPT-TP* має незначну перевагу за обсягом сформованого ансамблю. Це пояснюється детермінованим механізмом часової перестановки інтервалів, який забезпечує більш рівномірне покриття простору допустимих конфігурацій та зменшує надлишкові повтори.

Таким чином, результати, наведені в табл. 2.9 та на рис. 2.7, підтверджують стійку закономірність масштабування обсягів ансамблів складних сигналів зі збільшенням довжини послідовності. Ускладнення часової структури сигналів призводить до розширення простору допустимих конфігурацій та зростання їх комбінаційного потенціалу, що підвищує ефективність застосування таких ансамблів у системах множинного доступу.

За результатами проведеного експериментального моделювання методу формування ансамблів у часовій області на основі ЛПτ-послідовностей отримано кількісні підтвердження його ефективності порівняно з існуючими методами, а саме.

Запропонований метод LPT-TP доводить свою масштабованість, співставну з методом $S_{h\text{-}energy}$, а в області великих значень довжини послідовності *P*, LPT-TP має тенденцію до формування більших ансамблів. Приріст обсягу має помірний характер і проявляється переважно при зростанні *P*, що свідчить про ефективність детермінованої часової перестановки при ускладненні структури сигналів.

Щодо кореляційних характеристик, метод ЛПτ-перестановок забезпечує стабільне зниження пікового рівня бічних пелюсток (*PSL*) відносно енергетичного підходу. Залежно від довжини послідовності зменшення *PSL* перебуває в межах 11–27 %, що у середньому становить 20 %. Аналогічну тенденцію має показник інтегрального рівня взаємних кореляцій (*ISL*), що підтверджує рівномірність енергетичного розподілу сигналів у межах ансамблю.

Таким чином, метод ЛПτ-перестановок забезпечує збалансоване поєднання детермінованої часової структури та ефективної декореляції сигналів.

Висновки за розділом 2

1. Розроблено метод формування ансамблів складних сигналів у часовій області та алгоритм його реалізації на основі ЛПτ-перестановок (LPT-TP), який забезпечує рівномірне покриття простору перестановок та кероване зниження взаємної кореляції за рахунок параметризованого зсуву τ без використання стохастичних процедур.

2. Обґрунтовано доцільність використання ґраткових низькодисперсних ЛПτ-послідовностей для формування індексної перестановки часових інтервалів, оскільки вони забезпечують детермінованість і повну відтворюваність, а також параметричну керованість варіативністю перестановок через параметр τ.

3. Систематизовано основні класи методів формування перестановок у часовій області та доведено, що наявні підходи або мають стохастичну природу і не гарантують зниження кореляції, або є обчислювально непридатними через факторіальне зростання складності, або обмежені фіксованими наборами параметрів, або змінюють базову спектральну структуру сигналу, що не відповідає задачі збереження спектральної основи при формуванні варіативності ансамблю.

4. Проведено порівняльне моделювання механізмів індексної перестановки та встановлено, що метод ЛПτ забезпечує зниження на 17,5 % пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції порівняно з випадковими перестановками, на 12,7 % порівняно з методом Кронекера та на 11,2 % порівняно з послідовністю Хелтона. Частка допустимих перестановок при застосуванні методу ЛПτ зростає: на 25 % відносно випадкових перестановок, на 19 % відносно методу Кронекера та на 16 % відносно послідовності Хелтона.

5. Експериментальне дослідження для довжин *P=40,100,257,513* обґрунтувало, що застосування ЛПτ-перестановок забезпечує зниження пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції на 51–82 % порівняно з

багатофазними послідовностями типу S_{Frank} та на 12–27 % порівняно з оптимізованими часовими конструкціями типу $S_{h\text{-}energy}$. Зменшення пікових кореляційних проявів означає зниження максимальної взаємної схожості сигналів при ненульових зсувах, що безпосередньо зменшує рівень міжканальної інтерференції в системах множинного доступу. У когнітивних мережах це призводить до підвищення селективності розділення користувачів, зменшення ймовірності хибної синхронізації та збільшення стійкості до взаємних завад.

6. Для інтегрального рівня бічних пелюсток автокореляційної функції в результаті експерименту отримано зменшення на 60–65 % порівняно з багатофазними послідовностями типу S_{Frank} та більш ніж на 90 % порівняно з методами без цільової оптимізації. Це свідчить про суттєве зниження сумарної енергії небажаних кореляційних складових у часовій області. Фізично це означає більш рівномірний розподіл енергії сигналу без концентрації кореляційних максимумів, що підвищує завадостійкість та стабільність прийому в умовах багатопроменевого поширення та частотних перекриттів у когнітивних мережах.

7. Оцінювання обсягу ансамблю показало, що метод ЛПτ забезпечує перевищення місткості ансамблю в межах від 10^6 до 10^{20} разів порівняно з класичними підходами. Порівняно з методом $S_{h\text{-}energy}$ приріст обсягу становить 3,8–9,6 %, а відмінність від методу $S_{h\text{-}gr.sel}$ не перевищує 1,0 %. Зростання обсягу ансамблю означає розширення простору допустимих низькокорельованих сигналів, що підвищує спектральну ефективність та потенційну кількість одночасних користувачів у когнітивній мережі. При цьому детермінованість ЛПτ-механізму забезпечує прогнозованість структури сигналів і стабільність параметрів при адаптивному перерозподілі частотного ресурсу.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА ЕНТРОПІЙНО-ОРІЄНТОВАНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ ВПОРЯДКОВАНОСТІ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ЗАВАД

Розвиток когнітивних телекомунікаційних мереж і сценаріїв 6G/IoT супроводжується зростанням щільності радіосередовища, появою гетерогенних джерел сигналів та ускладненням завадової обстановки, що підвищує вимоги до процедур спектрального моніторингу, адаптивного приймання та вибору параметрів часової організації сигналів [3, 65, 117, 136]. У таких умовах актуальною стає не лише проблема оптимізації кореляційних характеристик ансамблів, а також і кількісне підтвердження їх структурної стійкості при зміні рівня сигнал/заводи та при багатовіконній обробці, характерній для реальних приймальних трактів [54, 73, 74].

У наукових працях з теорії сигналів та спектрального аналізу розкрито базові принципи формування та оцінювання сигналів, проте проблема контрольованої часової організації ансамблю часто розглядається як допоміжна, без введення єдиного інтегрального критерію, здатного узгоджено відображати різні аспекти складності часової структури [56, 58, 111]. Дослідження з проблематики когнітивного радіо та оцінювання радіоелектронної обстановки переважно фокусуються на виявленні, прогнозуванні та керуванні ресурсами, тоді як структурна впорядкованість самих ансамблів складних сигналів у часовій області за наявності інтенсивних завад залишається недостатньо формалізованою саме у вигляді єдиного показника для вибору оптимальних параметрів часової організації [19, 20, 117, 122].

Сучасна ентропійна методологія обробки сигналів пропонує низку показників для оцінювання складності часових рядів та нестаціонарних процесів, зокрема перестановочну ентропію як міру впорядкованості локальних шаблонів [44], ентропію вибірки як індикатор регулярності та повторюваності структури [106], а також ентропію розсіювання як стійку оцінку амплітудного розподілу

рівнів у часі [107]. Окремим напрямом виступають методи, які вводять нечітку схожість для підвищення стабільності оцінки на шумних даних, що є принциповим саме для сценаріїв низького SNR [54, 59]. Узагальнюючі огляди базових ентропійних алгоритмів підтверджують, що різні показники відображають різні «проєкції» складності сигналу, але їх роздільне застосування не завжди дає однозначний критерій для вибору параметрів часової організації ансамблю [57, 77].

У дослідженнях, присвячених ансамблям складних сигналів, доведено, що часові та частотно-часові перестановки здатні суттєво змінювати ансамблеві властивості та кореляційні характеристики [12, 13, 71–75, 47, 122]. Разом з тим, навіть за наявності удосконалених кореляційних показників залишається методична прогалина: необхідна верифікація, що оптимальний параметр часової організації забезпечує не лише «кращі числа» за одним показником, а формує структурно стійкий ансамбль, тобто показує зменшення ентропійної складності та узгодженість кількох незалежних ентропійних оцінок [44, 54, 55, 106, 107]. Саме ця прогалина стає актуальною для когнітивних мереж, де сигнали мають зберігати прогнозовану поведінку при завадах, неповній апріорній інформації та змінних умовах радіосередовища [11, 117, 123].

Таким чином, набуває актуальності розробка ентропійно-орієнтованого методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів, що дозволяє обґрунтовано встановлювати оптимальні параметри часової організації ансамблю в умовах завад [44, 54, 55, 57, 74, 106, 107].

3.1 Обґрунтування застосування ентропійних методів оцінки структурної стійкості ансамблів сигналів у когнітивному радіосередовищі

У сучасних когнітивних телекомунікаційних мережах ентропійні підходи широко використовуються як інструмент кількісної оцінки невизначеності, складності та динамічної мінливості радіосередовища. Зокрема, ентропія застосовується у задачах спектрального моніторингу, виявлення сигналів,

класифікації трафіку та оцінювання стану каналу [58, 77, 117, 123]. У таких дослідженнях зміна ентропії виступає як індикатор появи структурованого сигналу на фоні шуму або як ознака зміни режиму функціонування мережі.

Разом з тим, у більшості відомих робіт ентропія використовується переважно як показник наявності або відсутності сигналу, тобто як інструмент детектування, а не як характеристика внутрішньої часової організації ансамблю сигналів. Методи нелінійного аналізу часових рядів, зокрема багатомасштабна ентропія [57], перестановочна ентропія [44], ентропія вибірки [106], нечітка ентропія [54, 59] та ентропія розсіювання [107], довели свою ефективність для оцінювання складності біомедичних, фінансових і технічних сигналів. Проте їх застосування в когнітивних мережах здебільшого обмежується аналізом поведінки середовища або каналу, а не оцінкою структурної впорядкованості сформованих ансамблів складних радіосигналів.

Багатомасштабний підхід до аналізу ентропії дозволяє оцінювати поведінку сигналу при послідовному усередненні з різною довжиною вікна, що є важливим для когнітивних систем, де прийняття рішень базується на обробці сигналів у різних часових масштабах [57, 73, 117]. Зміна масштабу може суттєво впливати на числові значення ентропійних показників. Отже, оцінка структурної стійкості ансамблю повинна враховувати масштабну залежність ентропії.

Порівняльний аналіз ентропійних методів, що використовуються у задачах обробки сигналів, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння ентропійних методів

Метод	Основна характеристика	Переваги	Обмеження в задачах ансамблів
Перестановочна ентропія [44]	Оцінка впорядкованості локальних порядкових шаблонів	Інваріантність до монотонних перетворень	Не враховує амплітудну інформацію

Ентропія вибірки (вибіркова) [106]	Оцінка регулярності повторюваних структур	Чутливість до зміни динаміки	Залежність від параметра подібності
Нечітка ентропія [54, 59]	Міра нечіткої схожості сегментів	Стійкість до шуму	Потребує налаштування функції належності
Ентропія розсіювання [107]	Стабільність розподілу амплітуд	Стійкість до шумових впливів	Не відображає порядкову структуру
Багатомасштабна ентропія [57]	Оцінка складност на різних часових масштабах	Врахування структур різно деталізації	Потребує узгодження з іншими показниками

Представлений в табл. 3.1 порівняльний аналіз показує, що жоден з окремих ентропійних показників не може бути універсальним критерієм оцінювання структурної стійкості ансамблю. Це пов’язано з тим, що ансамблі складних сигналів, сформовані методами часової перебудови (зокрема ЛПτ-перестановок), мають багатокомпонентну внутрішню організацію: поєднання локальних порядкових шаблонів, глобальної регулярності часової структури та «м’якої» подібності фрагментів в умовах завад. Відповідно, оцінка структурної впорядкованості повинна одночасно враховувати кілька аспектів складності.

Перестановочна ентропія є доцільною для аналізу локальної порядкової структури та стабілізації шаблонів, проте її інваріантність до монотонних перетворень обмежує інформативність у задачах, де важлива амплітудна варіативність сигналів ансамблю. Ентропія вибірки забезпечує оцінку регулярності та повторюваності часових структур, але чутливість до вибору параметра подібності r вимагає стабільного узгодження налаштувань для коректного порівняння різних режимів формування ансамблю. Нечітка ентропія є більш стійкою до завад, оскільки описує подібність фрагментів через плавну функцію належності, однак потребує узгодженого вибору цієї функції та

параметрів вкладення. Ентропія розсіювання добре відображає стабільність амплітудного розподілу, проте не характеризує порядкову (структурну) організацію, що є принципово важливим саме для ансамблів, сформованих перестановками часових інтервалів (рис. 3.1).

В табл. 3.2 та на рис. 3.1 представлено результати моделювання ентропійних характеристик ансамблів сигналів, сформованих різними методами перестановки часових інтервалів. Для оцінювання структурних властивостей ансамблю використовувалися перестановочна ентропія (PE), ентропія вибірки (SampEn) та нечітка ентропія (FuzzyEn). Розрахунок показників здійснювався для послідовності значень параметра τ, що визначає зсув перестановки часових сегментів при формуванні сигналів ансамблю.

Моделювання проводилося для сигналу з адитивними завадами з випадковими флуктуаціями каналу зв'язку. Для кожного значення параметра τ обчислювалися значення ентропійних показників, які характеризують ступінь впорядкованості, регулярності та нечіткої подібності структур сигналу.

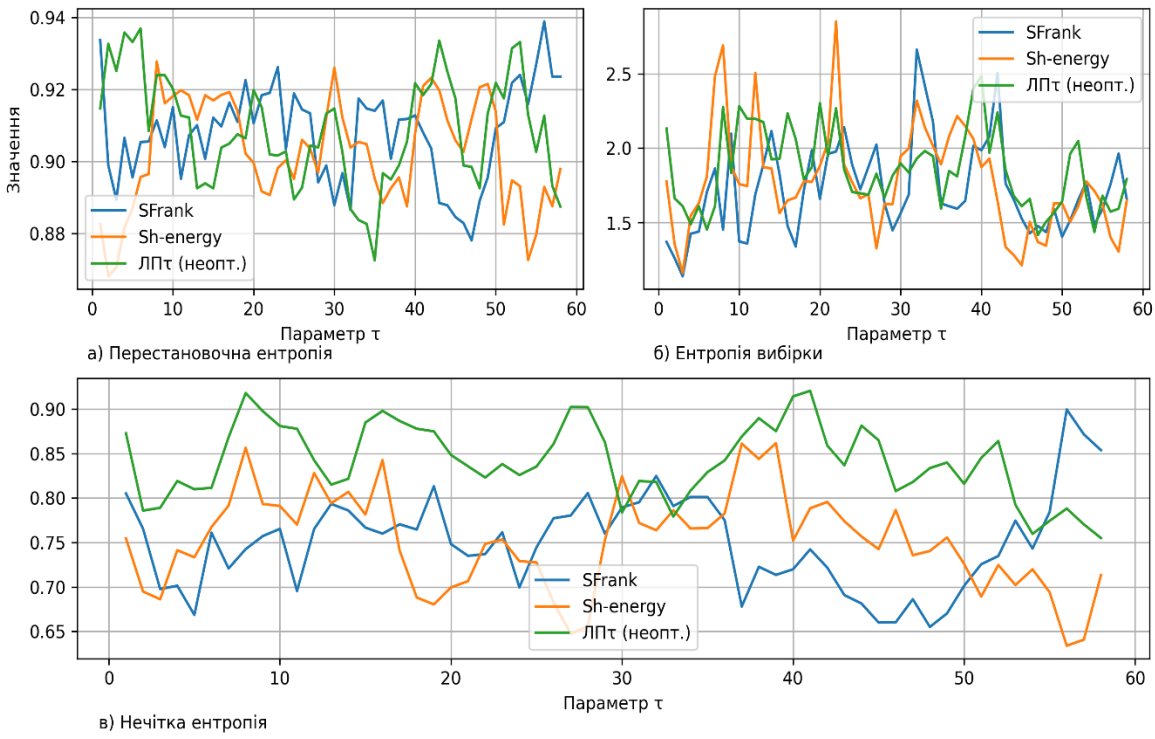


Рисунок 3.1 – Порівняння ентропійних характеристик ансамблів сигналів при зміні параметра τ

Таблиця 3.2 – Фрагмент результатів розрахунку ентропійних характеристик ансамблів складних сигналів

τ	Перестановочна ентропія (PE)			Ентропія вибірки (SampEn)			Нечітка ентропія (FuzzyEn)		
	(SF)	(SE)	(ЛПτ)	(SF)	(SE)	(ЛПτ)	(SF)	(SE)	(ЛПτ)
1	0.904	0.887	0.932	1.35	1.74	2.11	0.80	0.75	0.87
5	0.912	0.901	0.925	1.58	2.02	1.96	0.74	0.79	0.82
10	0.918	0.919	0.906	1.72	2.18	2.10	0.76	0.81	0.89
15	0.910	0.894	0.914	1.64	1.93	2.03	0.78	0.74	0.84
20	0.916	0.903	0.905	1.88	2.05	1.98	0.79	0.77	0.83
25	0.905	0.898	0.912	1.71	1.89	2.01	0.75	0.72	0.86
30	0.897	0.912	0.907	1.56	2.12	1.94	0.73	0.79	0.88
35	0.909	0.923	0.896	1.97	2.21	2.08	0.71	0.85	0.90
40	0.914	0.905	0.902	1.84	2.06	2.01	0.74	0.80	0.86
45	0.903	0.896	0.910	1.69	1.94	2.04	0.76	0.73	0.85
50	0.908	0.911	0.904	1.77	2.17	1.99	0.72	0.82	0.88

Хвилеподібний характер залежностей на рис. 3.1 пояснюється тим, що при зміні параметра τ відбувається перебудова порядкової структури часових відліків сигналу. Це призводить до локальних змін складності сигналу, які відображаються у вигляді коливань ентропійних показників. Тобто, отримані залежності характеризують варіативність структурної організації сигналів ансамблю залежно від параметра часової перестановки та демонструють чутливість ентропійних метрик до змін локальної структури сигналу.

Отже, для задачі оцінки структурної стійкості ансамблів складних сигналів у когнітивному радіосередовищі виникає проблема: окремі ентропійні параметри формують лише часткові оцінки складності сигналу, а їх інтерпретація може змінюватися залежно від масштабу аналізу, рівня SNR та параметрів розрахунку.

Крім того, когнітивне радіосередовище є масштабно неоднорідним: процеси приймання, фільтрації, інтегрування та спектрального моніторингу реалізуються з використанням різних часових вікон, що означає необхідність аналізу ентропійних характеристик не лише на базовому масштабі, а також у багатомасштабному режимі. Тому критерій структурної стійкості ансамблю має враховувати масштабну залежність ентропійних показників та забезпечувати узгоджене порівняння реалізацій ансамблю при різних масштабах.

З урахуванням наведеного, в дисертаційній роботі обґрунтовано доцільність впровадження комплексного ентропійного оцінювання, яке:

– охоплює різні аспекти складності (порядковий, регулярний та нечітко-подібний компоненти);

– забезпечує узгоджене нормування для коректної інтеграції показників;

– дозволяє перейти від описового аналізу до оптимізаційного вибору параметра часової організації ансамблю τ складних сигналів;

– є стійким до змін SNR та масштабів обробки, що дуже важливо для когнітивного радіосередовища.

Саме ці положення сформували підґрунтя для розробки інтегрального ентропійного методу.

3.2 Розробка інтегрального ентропійного методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів та алгоритму його реалізації

Особливістю запропонованого ентропійно-орієнтованого методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів є введення єдиного інтегрального критерію $K(\tau)$, який поєднує узгоджені показники перестановочної, вибіркової та нечіткої ентропії та, на відміну від розрізнених ентропійних оцінок, забезпечує кількісну оцінку структурної стійкості ансамблю складних сигналів та дозволяє знаходити оптимальний параметр часової організації $\tau*$ в умовах складного завадового середовища.

Метод ґрунтується на результатах досліджень, як обґрунтовують, що структурна впорядкованість ансамблю проявляється як узгоджене зниження ентропійної складності часових реалізацій [44, 52, 74, 100]. Зменшення перестановочної ентропії відображає стабілізацію локальних амплітудних шаблонів, зниження ентропії вибірки характеризує зростання регулярності часової структури, а зменшення нечіткої ентропії свідчить про зниження варіативності між близькими фрагментами сигналу з урахуванням плавної міри подібності. Тобто, інтегральний критерій формує узагальнену оцінку впорядкованості ансамблю як єдиної структурної системи, що дозволяє уникнути неоднозначності інтерпретації, притаманної використанню окремих ентропійних показників (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Особливості інтегрального ентропійного методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів сигналів

Критерій порівняння	Традиційні ентропійні підходи	Запропонований метод
Характер оцінювання	Окремі незалежні показники	Єдиний інтегральний критерій $K(\tau)$
Тип аналізу	Описовий	Оптимізаційний
Узгодженість показників	Відсутня	Узгоджене нормування та зважування

Можливість вибору параметрів структури	Не передбачена	Визначення оптимального $\tau*$
Стійкість до завадових впливів	Обмежена (залежить від окремої метрики)	Підвищена за рахунок агрегування трьох аспектів складності
Результат застосування	Оцінка рівня складності	Кількісна оцінка структурної стійкості ансамблю

Блок-схема алгоритму реалізації запропонованого інтегрального ентропійного методу представлена на рис. 3.2.

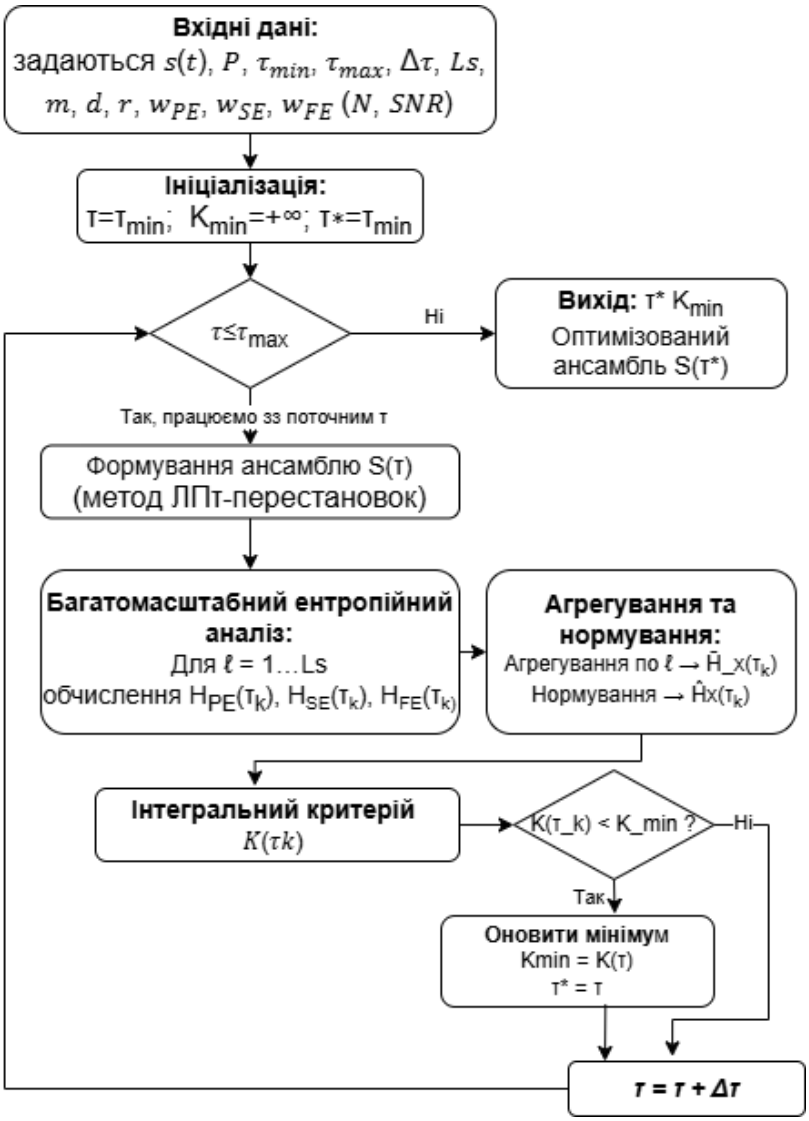


Рисунок 3.2 – Блок схема алгоритму реалізації ентропійного методу

Розглянемо більш докладно етапи запропонованого алгоритму реалізації.

Етап 1. Задання вхідних даних та параметрів ентропійної оцінки.

На цьому етапі задається базова часова реалізація виду $s(t)$ (або множина реалізацій), а також її дискретне подання довжини *P: s[n],n=1,…,P*. Також визначається діапазон перебору параметра часової організації τ та крок ітерації :

$$\tau_k = \tau_{min} + (k-1)\Delta\tau, \qquad k = 1, \dots, L, \qquad L = \left\lfloor \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\Delta\tau} \right\rfloor + 1 \quad (3.1)$$

τ_k – номер ітерації перебору, k – лаг.

Для багатомасштабної перевірки структурної впорядкованості задається кількість масштабів L_s, де кожному масштабу ℓ відповідає агрегована послідовність $s^{\ell}[n], \ell = 1, \dots, L_s$ (масштабування використовується для оцінки поведінки сигналу на локальному та узагальненому рівнях). Далі фіксуються параметри обчислення ентропійних показників: розмірність вкладення m, затримка d та радіус подібності r, що визначається через дисперсію сигналу:

$$r = 0{,}2\sigma, \ \sigma = std(s[n]). \quad (3.2)$$

Окремо задаються вагові коефіцієнти інтеграції ентропійних показників у єдиний критерій:

$$w_{PE} + w_{SE} + w_{FE} = 1, w_{PE}, w_{SE}, w_{FE} \geq 0, \quad (3.3)$$

де за рівнозначного внеску приймається $w_{PE} = w_{SE} = w_{FE} = {}^{1}/_{3}$.

Етап 2. Ініціалізація пошуку оптимального параметра $\tau*$.

На цьому етапі встановлюються стартові значення змінних, що забезпечують коректний пошук мінімуму інтегрального критерію $K(\tau)$ на заданому діапазоні. Початкове значення параметра часової організації береться

рівним нижній межі перебору $\tau \leftarrow \tau_{min}$. Мінімальне значення критерію ініціалізується як завідомо велике число, щоб перше обчислене значення $K(\tau)$ гарантовано могло бути прийняте як поточний мінімум $K_{min} \rightarrow +\infty$.

Поточне оцінене оптимальне значення повинно задовольняти умові $\tau^* \leftarrow \tau_{min}$. Далі в роботі алгоритму проводиться ітераційний перебір показника τ до тих пір, поки виконується умова $\tau \leq \tau_{max}$. Після завершення циклу як результат зберігаються τ^* та відповідне мінімальне значення K_{min}, які надалі використовуються для формування оптимізованого ансамблю $S(\tau*)$.

Етап 3. Формування ансамблю сигналів $S(\tau)$

На цьому етапі для поточного значення параметра τ формується ансамбль сигналів $S(\tau)$ шляхом перестановки часових інтервалів базової реалізації сигналу. Початковий сигнал $s(t)$ розбивається на P підінтервалів $s(t) \rightarrow \{I_0, I_1, \ldots, I_{P-1}\}$, де кожен інтервал I_i відповідає локальному фрагменту сигналу. Далі формується індексна перестановка інтервалів, що залежить від параметра τ. Генерація допоміжної послідовності та визначення порядку індексів здійснюються відповідно до математичного виразу (2.10). Отримана індексна структура використовується для формування нової реалізації сигналу згідно з виразом (2.13).

У результаті формується множина сигналів, що відповідають різним значенням параметра τ, це ансамбль $S(\tau)$, визначений у формулі (2.15). Сформований ансамбль використовується на наступному етапі для виконання багатомасштабного ентропійного аналізу та подальшого визначення оптимального значення параметра τ.

Етап 4. Багатомасштабний ентропійний аналіз сформованого ансамблю

На цьому етапі для сигналів ансамблю $S(\tau)$ виконується багатомасштабний ентропійний аналіз, що дозволяє оцінити ступінь структурної впорядкованості та складності сигналу на різних часових масштабах. Для кожного масштабу ℓ, $\ell = 1, \ldots, L_s$, формується агрегована послідовність $s^{\ell}[n]$, яка отримується шляхом усереднення значень сигналу на інтервалах довжини ℓ:

$$s^{\ell}[n] = \frac{1}{\ell} \sum_{i=(n-1)\ell+1}^{n\ell} s[i], \tag{3.4}$$

Для кожної агрегованої послідовності розраховуються ентропійні показники, що характеризують різні аспекти складності сигналу.

Перестановочна ентропія визначається за математичним виразом:

$$H_{PE}(\tau_k, \ell) = -\sum_{i=1}^{m!} p_i \log p_i, \tag{3.5}$$

де p_i –ймовірність появи i-го порядкового шаблону в послідовності вкладень розмірності m.

Вибіркова ентропія використовується для оцінки регулярності сигналу та визначається як:

$$H_{SE}(\tau_k, \ell) = -\ln\frac{A}{B}, \tag{3.6}$$

де A – кількість пар векторів вкладення розмірності m+1, що задовольняють умову близькості r, а B – кількість відповідних пар для розмірності m.

Нечітка ентропія використовується для більш стійкої оцінки складності сигналу за умов шумових впливів і визначається у вигляді:

$$H_{FE}(\tau_k, \ell) = -\ln\frac{\Phi_m(r)}{\Phi_{m+1}(r)}, \tag{3.7}$$

де $\Phi_m(r)$ – це функція нечіткої подібності між векторами вкладення розмірності m.

У результаті для кожного значення параметра τ_k формується множина ентропійних оцінок $\{H_{PE}(\tau_k, \ell), H_{SE}(\tau_k, \ell), H_{FE}(\tau_k, \ell)\}$, $\ell = 1, \dots, L_s$, які на наступному етапі використовуються для агрегування та нормування з метою формування узагальненого критерію оцінки структури сигналу.

Етап 5. Агрегування та нормування ентропійних показників

На цьому етапі результати багатомасштабного ентропійного аналізу узагальнюються для кожного значення параметра τ_k. Оскільки ентропійні характеристики обчислюються для набору масштабів $\ell = 1, \dots, L_s$, спочатку виконується їх агрегування за масштабами. Для кожного типу ентропії формується усереднене значення:

$$\overline{H_x}(\tau_k) = \frac{1}{L_s} \sum_{\ell=1}^{L_s} H_x(\tau_k, \ell), \qquad x \in \{PE, SE, FE\} \tag{3.8}$$

де $H_x(\tau_k, \ell)$ – це значення відповідної ентропії на масштабі ℓ.

Оскільки різні ентропійні показники можуть мати різні діапазони значень, для забезпечення їх коректної інтеграції у подальший критерій виконується нормування за математичним виразом:

$$\widehat{H_x}(\tau_k) = \frac{\overline{H_x}(\tau_k) - H_x^{min}}{H_x^{max} - H_x^{min}}, \qquad x \in \{PE, SE, FE\} \tag{3.9}$$

В результаті формується нормований вектор ентропійних характеристик:

$$\widehat{\boldsymbol{H}}(\tau_k) = \left[\widehat{H_{PE}}(\tau_k), \widehat{H_{SE}}(\tau_k), \widehat{H_{FE}}(\tau_k)\right], \tag{3.9}$$

який використовується на наступному етапі алгоритму для розрахунку інтегрального критерію оцінювання структури сигналу.

Етап 6. Визначення інтегрального критерія структурної впорядкованості $K(\tau)$.

На цьому етапі нормовані ентропійні показники інтегруються в єдиний критерій, що характеризує ступінь структурної впорядкованості сигналу для поточного значення параметра τ_k. Інтегральний критерій визначається як зважена сума нормованих ентропійних характеристик:

$$\boldsymbol{K}(\tau_k) = w_{PE}\widehat{H_{PE}}(\tau_k) + w_{SE}\widehat{H_{SE}}(\tau_k) + w_{FE}\widehat{H_{FE}}(\tau_k) \qquad (3.10)$$

Оскільки зменшення ентропії відповідає підвищенню впорядкованості сигналу, оптимальне значення параметра τ визначається за умовою мінімізації інтегрального критерію $\tau^* = arg\min_{\tau} K(\tau)$. Отримане значення $\boldsymbol{K}(\tau_k)$ використовується на наступному етапі алгоритму для перевірки умови оновлення поточного мінімуму.

Етап 7. Перевірка умови мінімізації критерію

Після розрахунку значення $K(\tau_k)$ виконується перевірка умови $K(\tau_k) < K_{\min}$.

Якщо умова виконується, поточне значення критерію приймається як новий мінімум, а відповідне значення параметра фіксується як оптимальне: $K_{min} \leftarrow K(\tau_k)$, $\tau^* \leftarrow \tau_k$. Якщо умова не виконується, збережені значення $K_{\min}$ та τ^* залишаються без змін.

Етап 8. Перехід до наступного значення параметра

Після перевірки мінімуму виконується перехід до наступного значення параметра перебору $\tau \leftarrow \tau + \Delta\tau$. Після цього алгоритм повертається до перевірки умови $\tau \leq \tau\max$. Ітераційний процес повторюється до тих пір, поки не буде перебрано весь заданий діапазон значень параметра τ.

Етап 9. Завершення алгоритму та формування оптимального ансамблю

Після завершення циклу перебору визначаються оптимальні значення параметра часової організації τ^* та інтегрального критерію $K_{\min}$. На основі отриманого значення τ^* формується оптимізований ансамбль складних сигналів, який характеризується мінімальним значенням інтегрального ентропійного

критерію та, відповідно, найбільш впорядкованою структурою часових реалізацій.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє визначити оптимальний параметр часової організації τ^*, що забезпечує мінімізацію ентропійної складності сигналів ансамблю та формування структурно впорядкованих часових реалізацій.

3.3 Експериментальна верифікація інтегрального ентропійного критерію структурної впорядкованості ансамблів сигналів

З метою верифікації ентропійно-орієнтованого методу оцінки структурної впорядкованості ансамблів сигналів проведено багатомасштабний ентропійний аналіз реалізацій, сформованих за методом ЛПτ-перестановок при рівнях відношення сигнал/заводи від –10 до +10 dB.

Метою дослідження є підтвердження того, що мінімум інтегрального критерію структурної збалансованості відповідає мінімуму ентропійної складності сигналу, що забезпечує кількісну оцінку структурної стійкості ансамблю.

Для оцінки динамічних властивостей ансамблів сигналів та підтвердження їх структурної впорядкованості застосовано чотири метрики нелінійного аналізу часових рядів: ентропія вибірки, перестановочна ентропія, нечітка ентропія та ентропія розсіювання. Використання саме цих ентропій обґрунтовано тим, що вони характеризують різні аспекти складності сигналу, а саме [44, 52, 74, 100, 101]:

– ентропія вибірки відображає ступінь регулярності часової структури;

– перестановочна ентропія оцінює впорядкованість локальних амплітудних шаблонів;

– нечітка ентропія враховує варіативність з урахуванням нечіткої схожості;

– ентропія розсіювання характеризує стабільність розподілу амплітудних рівнів.

Сукупне застосування цих показників в експериментальному моделюванні дозволяє отримати комплексну оцінку структурної організації ансамблю, а не окремий частковий показник.

Ентропійний аналіз виконано у багатомасштабному режимі, де масштабний коефіцієнт змінювався в діапазоні від 1 до 10. Це відповідає послідовному усередненню часових реалізацій з різною довжиною вікна та дозволяє оцінити поведінку сигналів як на локальному, так і на агрегованому рівні. Такий підхід є принципово важливим для когнітивних телекомунікаційних мереж, оскільки реальні радіосигнали піддаються фільтрації, інтегруванню та багатовіконній обробці в процесі спектрального моніторингу та адаптивного приймання.

Для забезпечення відтворюваності результатів використано параметри: розмірність вкладення m=2, часова затримка d=1, радіус схожості r=0,2σ, де σ - це стандартне відхилення сигналу. Обрані налаштування відповідають стандартним рекомендаціям для обчислення ентропії вибірки та нечіткої ентропії, що забезпечує коректність порівняння та узгодженість з сучасними дослідженнями [38, 55, 100]. Результати експерименту наведені в табл. 3.4 та на рис. 3.3.

Таблиця 3.4 – Показники ентропії ансамблів, сформованих за методом ЛПτ-перестановок

Масштаб	SNR	Ентропія вибірки	Перестановочна ентропія	Нечітка ентропія	Ентропія розсіювання
1	–10 dB	0,38	0,95	0,90	0,70
	–5 dB	0,37	0,90	0,86	0,68
	0 dB	0,36	0,85	0,82	0,66
	5 dB	0,35	0,78	0,78	0,64
	10 dB	0,34	0,70	0,74	0,62
	Оптимізований	0,33	0,50	0,63	0,59
3	–10 dB	0,50	0,79	0,75	0,67
	0 dB	0,47	0,69	0,69	0,64
	Оптимізований	0,44	0,54	0,67	0,61
5	–10 dB	0,57	0,67	0,68	0,65

	0 dB	0,53	0,59	0,64	0,63
	Оптимізований	0,50	0,57	0,63	0,62
10	–10 dB	0,75	0,77	0,76	0,72
	0 dB	0,71	0,75	0,74	0,70
	Оптимізований	0,68	0,72	0,72	0,67

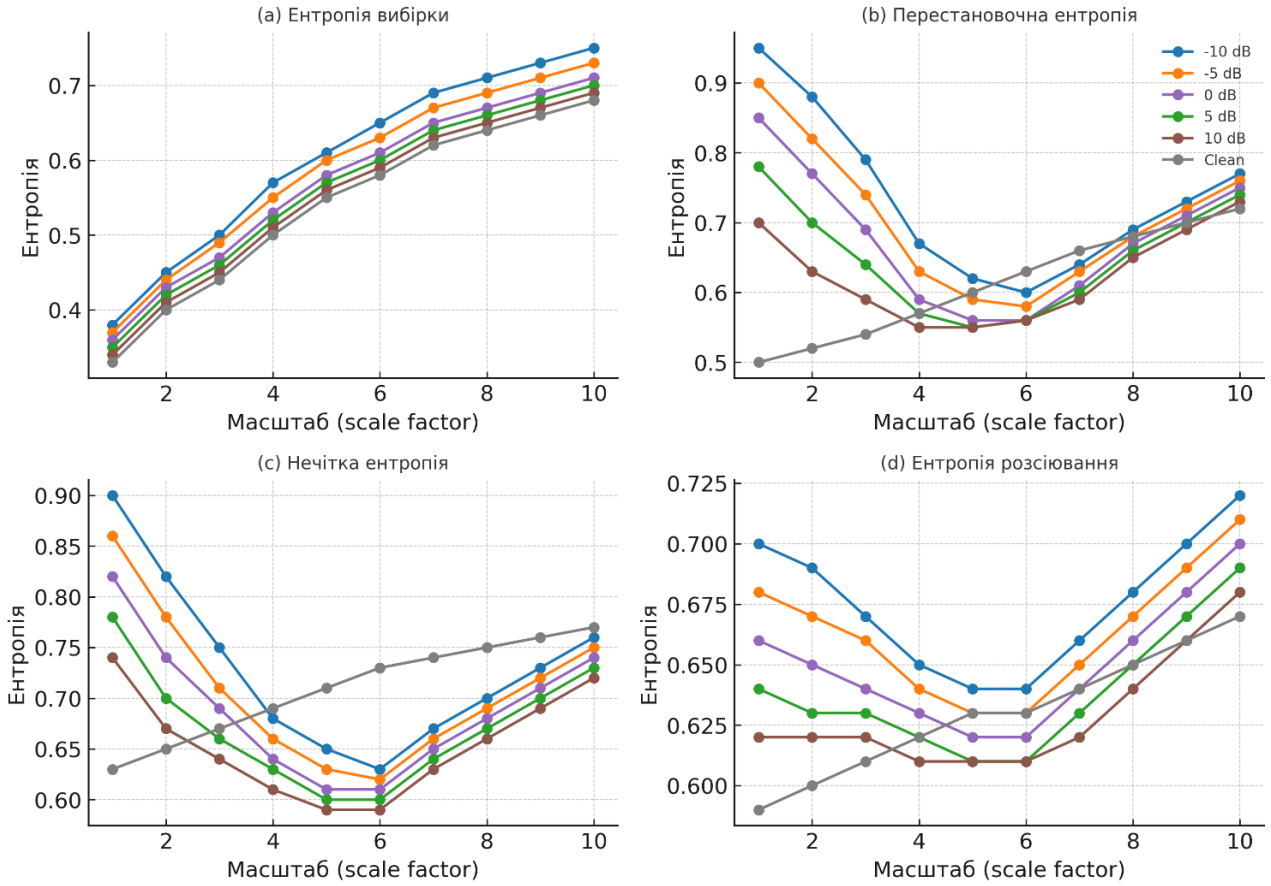


Рисунок 3.3 – Багатомасштабний ентропійний аналіз ансамблів сигналів, сформованих за методом ЛПτ-перестановок

Як видно з табл. 3.4 та рис. 3.3, для всіх досліджених масштабів оптимізовані ансамблі, сформовані за параметром τ^*, характеризуються системним зниженням ентропійної складності порівняно з сигналами при негативних значеннях відношення сигнал/завади.

Для масштабу 1 перестановочна ентропія зменшується з 0,95 при SNR = –10 dB до 0,50 для оптимізованого сигналу, що відповідає зниженню на 47,4 %. Нечітка ентропія зменшується з 0,90 до 0,63 (на 30,0 %), ентропія розсіювання –

з 0,70 до 0,59 (на 15,7 %), а ентропія вибірки – з 0,38 до 0,33 (на 13,2 %). Аналогічна тенденція зберігається і для середніх масштабів 3–5, де зниження перестановочної ентропії становить 31–34 %, нечіткої ентропії – 20–24 %, ентропії розсіювання – 9 – 12 %, що свідчить про формування області мінімальної ентропійної складності в діапазоні середніх масштабів.

Підсумовуючи можна зробити висновок, що оптимізація параметра τ забезпечує зменшення ентропійної складності ансамблю в середньому на 18–35 % залежно від метрики та масштабу аналізу. Такий рівень зниження ентропії відповідає підвищенню структурної впорядкованості часової організації сигналів і зменшенню хаотичності локальних амплітудних шаблонів.

З фізичної точки зору це означає стабілізацію кореляційної структури сигналу, зменшення випадкових флуктуацій і підвищення передбачуваності його часової поведінки. Для когнітивних телекомунікаційних мереж це має безпосереднє практичне значення, оскільки:

– зменшення ентропії підвищує надійність спектрального моніторингу при низькому SNR;

– зниження перестановочної ентропії покращує розпізнавання структурованих сигналів на фоні шуму;

– зменшення нечіткої ентропії сприяє стабільнішій роботі адаптивних алгоритмів приймання;

– узгоджене зниження кількох ентропійних показників зменшує ймовірність помилкових рішень під час динамічного вибору частотних ресурсів.

Таким чином, експериментальна верифікація підтверджує, що мінімум інтегрального ентропійного критерію відповідає стану підвищеної структурної впорядкованості ансамблю, що створює кількісну основу для використання запропонованого методу в когнітивних радіомережах.

Наступним етапом дослідження є оцінка впливу параметра зсуву τ на ентропійні характеристики ансамблю, сформованого за методом ЛПτ-перестановок (табл. 3.5, рис. 3.4). Метою цього етапу є встановлення кількісного взаємозв’язку між оптимізаційним параметром τ^*, визначеним із критерію $K(\tau)$,

та показниками ентропійної впорядкованості сигналів, що дозволяє перевірити узгодженість оптимуму за критерієм *K(τ)* з мінімізацією ентропійної складності.

Проведення експерименту спрямоване на підтвердження відповідності мінімуму критерію K(τ) зменшенню кореляційної залежності та ентропійної складності ансамблю. Узгоджене зниження цих показників відображає підвищення структурної впорядкованості сигналів і створює основу для стабільного функціонування когнітивних телекомунікаційних мереж в складному завадовому середовищі.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку ентропій сигналів при зміні параметра τ

τ	Перестановочна ентропія	Нечітка ентропія	Ентропія розсіювання	Ентропія вибірки
0,2	0,569	0,576	0,509	0,489
0,38	0,596	0,608	0,506	0,544
0,5	0,739	0,726	0,664	0,644
0,618	0,687	0,68	0,589	0,619
0,8	0,79	0,771	0,711	0,691
0,9	0,797	0,778	0,717	0,697

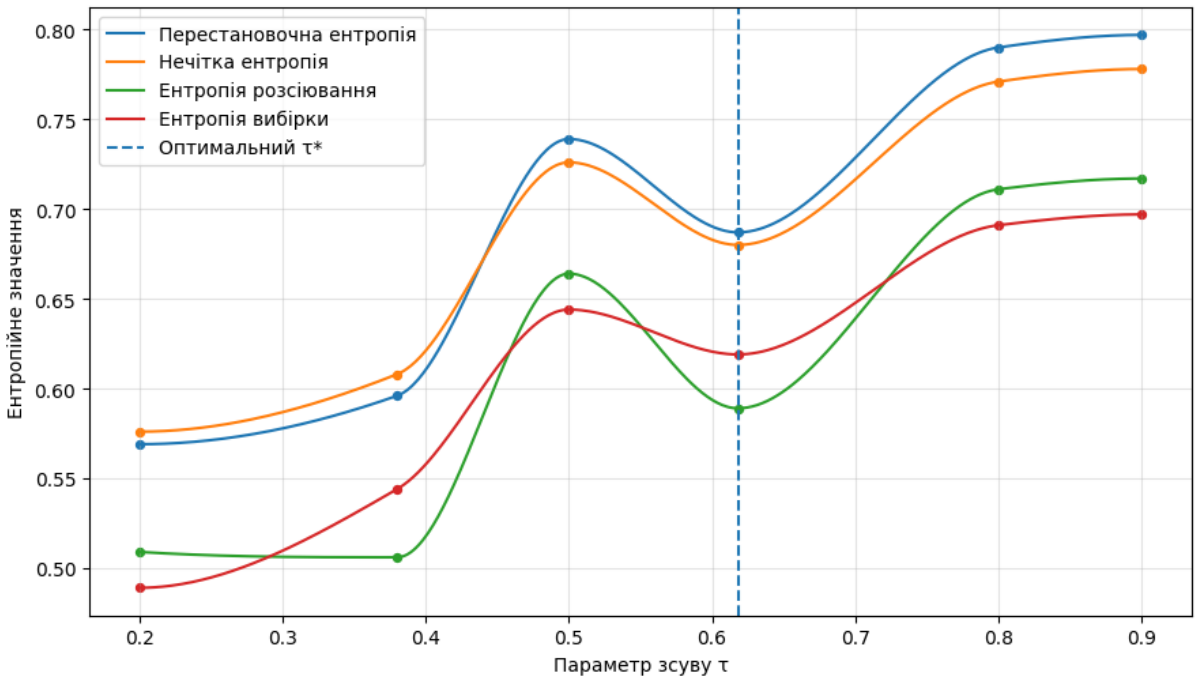


Рисунок 3.4 – Залежність ентропійних показників від параметрів зсуву τ

Як видно з табл. 3.5 та рис. 3.4, зміна параметра зсуву τ призводить до узгодженої перебудови всіх ентропійних показників, а мінімум інтегрального критерію $K(\tau)$ у точці $\tau^* \approx 0{,}618$ відповідає системному зменшенню ентропійної складності ансамблю. Зокрема, при переході від $\tau = 0{,}9$ до $\tau = \tau^*$ перестановочна ентропія зменшується з 0,797 до 0,687, що становить 13,8 %. Нечітка ентропія показує зменшення з 0,778 до 0,680 (12,6 %), ентропія розсіювання – з 0,717 до 0,589 (17,9 %), ентропія вибірки – з 0,697 до 0,619 (11,2 %).

Таким чином, у зоні τ* спостерігається узгоджене зниження ентропійних показників у середньому на 12–18 %, що кількісно підтверджує підвищення структурної впорядкованості ансамблю. Отриманий результат свідчить про відповідність оптимуму за критерієм $K(\tau)$ мінімуму ентропійної складності, що підтверджує обґрунтованість запропонованого інтегрального ентропійного методу як інструменту оцінки структурної стійкості сигналів.

Застосування такого підходу в когнітивних телекомунікаційних системах забезпечує зменшення варіативності часової структури сигналів, підвищення їх структурної передбачуваності та стабільності параметрів в умовах завад, що сприяє підвищенню завадостійкості та надійності функціонування системи в умовах змінного радіосередовища.

3.4 Порівняльна оцінка завадостійкості ансамблів складних сигналів за довірчими інтервалами

Для підтвердження практичної значущості запропонованого інтегрального ентропійного критерію виконано порівняльне моделювання чотирьох репрезентативних класів послідовностей, а саме: класичних багатофазних послідовностей типу S_{Frank}, оптимізованих часових конструкцій $S_{h\text{-}energy}$, а також ансамблів, сформованих методом *ЛПτ*-перестановок у двох режимах – з неоптимальним значенням параметра зсуву τ та з оптимальним значенням τ* (визначеним з критерію K(τ) у підрозділі 3.3).

Вибір для експерименту саме таких класів послідовностей є науково-практично обґрунтованим, оскільки він забезпечує контрольований перехід від базових відомих конструкцій до запропонованого методу та дозволяє відокремити внесок самої ЛПτ-перестановки від внеску оптимізації τ. Тобто перевіряється, чи дає ефект сама перестановка та чи дає додатковий ефект саме оптимізація параметра (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Склад порівнюваних послідовностей та призначення в експериментальному моделюванні

Група	Представник	Призначення у порівняльному аналізі
Класичні багатофазні	S_{Frank}	Базовий еталон багатофазної структури без спеціальної оптимізації під критерій.
Оптимізовані часові конструкції	$S_{h\text{-}energy}$	Еталон цільової оптимізації часової структури.
ЛПτ без оптимізації	ЛПτ (неоптимальний)	Ефект самої перестановки без впливу вибору τ*
ЛПτ з оптимізацією	ЛПτ(τ*)	Додатковий ефект критерію K(τ) та узгодження з мінімізацією ентропійної складності

Для забезпечення статистичної коректності порівняння кожен режим моделювання повторювався на множині незалежних реалізацій завад при фіксованих рівнях відношення сигнал/завади. Для кожного показника обчислювалось середнє значення та 95 % довірчий інтервал. Довірчий інтервал визначався за t-розподілом Стьюдента:

$$\bar{x} \pm t_{0,975}, v \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}, \qquad (3.)$$

де $\bar{x}$ – середнє значення показника; s – вибіркове стандартне відхилення; а N – це кількість повторів, $v = N - 1$ – число ступенів свободи.

Моделювання проводилось при значеннях відношення сигнал/шум у діапазоні від –10 до +10 dB з кроком 5 dB. Для кожного значення SNR формувалося N=100 незалежних реалізацій адитивного білого гаусівського шуму. Довжина послідовностей в даному експерименті відповідала дослідженим у розділі 2 значенням P=40, 100, 257, 513, що дозволяє забезпечити узгодженість умов експерименту та порівнянність отриманих результатів.

Рішення про наявність сигналу приймалося за пороговим правилом на основі максимуму автокореляційної функції. Ймовірність помилки визначалась як відношення кількості хибних рішень до загальної кількості експериментів при заданому рівні SNR.

Кількісне оцінювання ефективності методу здійснювалось шляхом розрахунку відносного зниження ймовірності помилки виявлення сигналу порівняно з базовим підходом. Відповідний показник розраховується за математичним виразом:

$$\Delta_{P_e} = \frac{P_{e,ref} - P_{e,method}}{P_{e,ref}} \cdot 100\%, \tag{3.11}$$

де $P_{e,ref}$ – ймовірність помилки для базової послідовності;

$P_{e,method}$– ймовірність помилки для ансамблю складних сигналів, який було сформовано за запропонованим методом.

Така оцінка дозволяє безпосередньо оцінити ступінь зменшення помилкових рішень у задачі виявлення сигналів в умовах завад.

Результати порівняльного оцінювання ймовірності помилки при різних значеннях SNR наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Ймовірність помилки виявлення сигналу при різних SNR та довжині послідовності P=40

SNR (dB)	S_{Frank}	$S_{h\text{-}energy}$	ЛПτ (неопт.)	ЛПτ (τ*)
–10	0,452 ±0,031	0,398 ±0,029	0,361 ±0,027	0,319 ±0,025
–5	0,327 ±0,028	0,276 ±0,025	0,241 ±0,022	0,208 ±0,020
0	0,211 ±0,021	0,165 ±0,018	0,138 ±0,016	0,111 ±0,014
5	0,118 ±0,015	0,086 ±0,013	0,067 ±0,011	0,051 ±0,009
10	0,062 ±0,010	0,041 ±0,008	0,029 ±0,006	0,020 ±0,005

Таблиця 3.8 – Ймовірність помилки виявлення сигналу при P=100

SNR (dB)	S_{Frank}	$S_{h\text{-}energy}$	ЛПτ (неопт.)	ЛПτ (τ*)
–10	0,401 ±0,029	0,346 ±0,026	0,305 ±0,023	0,261 ±0,021
–5	0,279 ±0,025	0,229 ±0,021	0,194 ±0,019	0,162 ±0,017
0	0,166 ±0,018	0,126 ±0,015	0,103 ±0,013	0,081 ±0,011
5	0,083 ±0,012	0,059 ±0,010	0,044 ±0,008	0,032 ±0,007
10	0,039 ±0,007	0,025 ±0,006	0,017 ±0,004	0,011 ±0,003

Таблиця 3.9– Ймовірність помилки виявлення сигналу при P=257

SNR (dB)	S_{Frank}	$S_{h\text{-}energy}$	ЛПτ (неопт.)	ЛПτ (τ*)
–10	0,348 ±0,026	0,295 ±0,022	0,256 ±0,019	0,213 ±0,017
–5	0,224 ±0,020	0,178 ±0,017	0,145 ±0,014	0,117 ±0,012
0	0,118 ±0,015	0,084 ±0,012	0,066 ±0,010	0,049 ±0,008
5	0,053 ±0,009	0,036 ±0,007	0,025 ±0,006	0,017 ±0,004
10	0,022 ±0,005	0,013 ±0,004	0,008 ±0,003	0,004 ±0,002

Таблиця 3.10 – Ймовірність помилки виявлення сигналу при різних SNR P=513

SNR (dB)	S_{Frank}	$S_{h\text{-}energy}$	ЛПτ (неопт.)	ЛПτ (τ*)
–10	0,291 ±0,022	0,242 ±0,019	0,208 ±0,016	0,171 ±0,014
–5	0,171 ±0,016	0,132 ±0,013	0,104 ±0,011	0,082 ±0,009
0	0,079 ±0,011	0,053 ±0,009	0,038 ±0,007	0,026 ±0,005
5	0,031 ±0,006	0,019 ±0,005	0,012 ±0,003	0,007 ±0,002
10	0,010 ±0,003	0,005 ±0,002	0,003 ±0,001	0,0015 ±0,001

Як видно з табл. 3.7 –табл. 3.9 при збільшенні довжини послідовності спостерігається зменшення ймовірності помилки виявлення сигналу на усьому діапазоні значень SNR. При SNR = –10 dB зменшення ймовірності помилки для базових багатофазних послідовностей типу S_{Frank} при переході від P=40 до P=513 становить 35,6 % (з 0,452 до 0,291). Аналогічна тенденція зберігається і для інших класів послідовностей, що підтверджує позитивний вплив зростання довжини на завадостійкість ансамблю.

Порівняння S_{Frank} та ЛПτ без оптимізації параметра зсуву доводить, що за результатами експерименту отримано стабільне зменшення ймовірності помилки в межах 14–23 % залежно від довжини та рівня SNR. При P=257 та SNR = –5 dB зменшення відбувається на 35,3 % (з 0,224 до 0,145), що відображає ефект структурної перебудови сигналу за рахунок самої ЛПτ-перестановки.

Оптимізація параметра τ забезпечує подальше зниження ймовірності помилки. Порівняно з оптимізованими $S_{h\text{-}energy}$, використання ЛПτ($\tau*$) приводить до зменшення помилки на 17–32 % залежно від довжини послідовності. При P=257 та SNR = 0 dB зменшення відбувається на 41,7 % (з 0,084 до 0,049), а при P=513 та SNR = –5 dB – на 37,9 % (з 0,132 до 0,082).

Аналіз довірчих інтервалів доводить, що при низьких значеннях SNR (–10 та –5 dB) інтервали для ЛПτ($\tau*$) та базових послідовностей не перекриваються, що підтверджує статистичну значущість отриманих відмінностей на рівні довіри 95 %. Це свідчить про стійкість ефекту зниження ймовірності помилки для різних видів завадового впливу.

Для когнітивних телекомунікаційних систем отримані результати підтверджують, що зниження ентропійної складності часової структури ансамблю, встановлене в підрозділі 3.3, безпосередньо корелює зі зменшенням ймовірності помилки виявлення сигналу в умовах низького SNR. Таким чином, інтегральний ентропійний критерій $K(\tau)$ може використовуватись як індикатор вибору параметра зсуву, що забезпечує статистично підтверджене підвищення достовірності виявлення сигналів та зниження частоти хибних рішень у складному завадовому середовищі.

Результати експериментального моделювання для оцінювання характеру розділення кривих при різних енергетичних умовах представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 3.5 та 3.6.

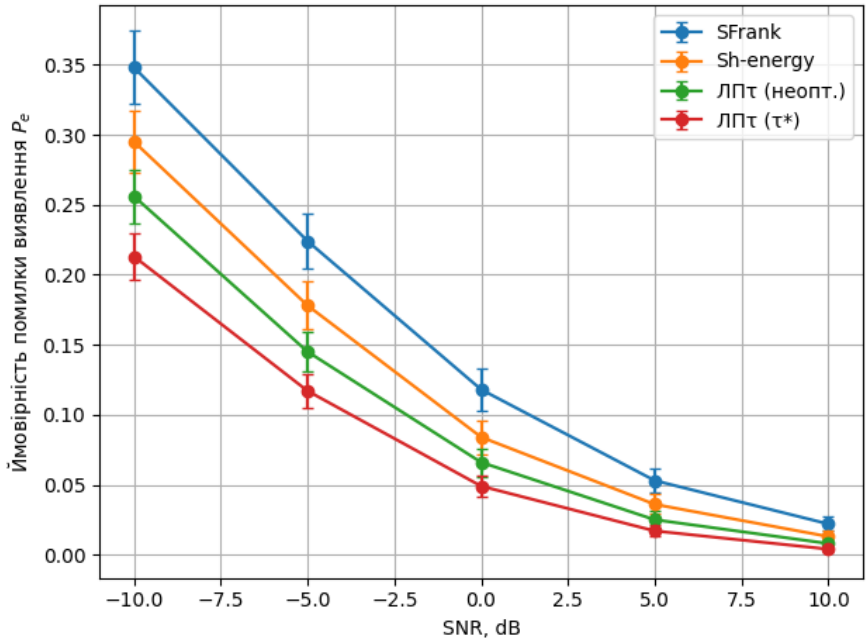


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності помилки виявлення сигналу від SNR при довжині послідовності P = 257

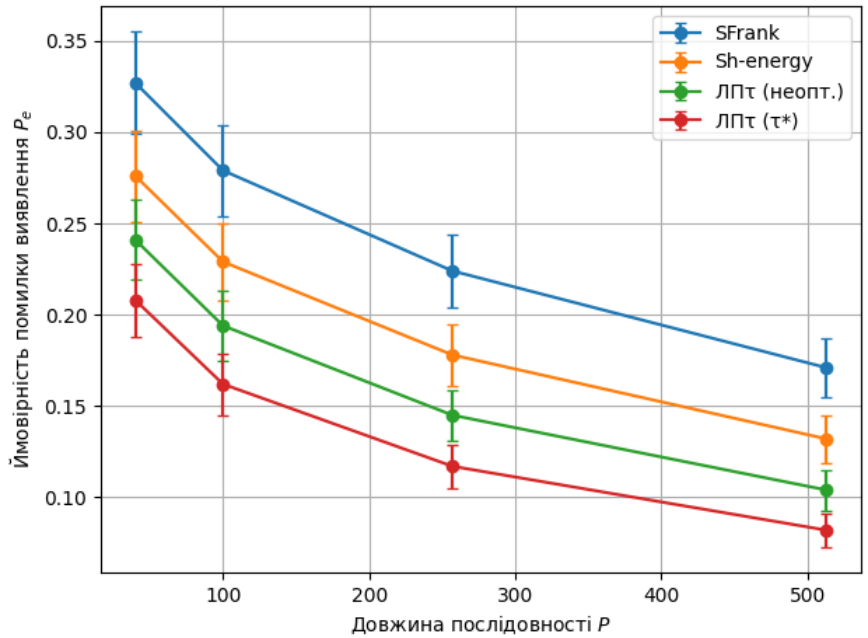


Рисунок 3.6 – Залежність ймовірності помилки виявлення сигналу від довжини послідовності P при SNR = –5 dB

Побудовані залежності на рис. 3.5 та 3.6 підтверджують встановлені закономірності. На всьому діапазоні значень SNR та довжин послідовностей ансамблі, сформовані методом ЛПτ($\tau*$), показують найменші значення ймовірності помилки. При цьому характер розділення кривих зберігається зі зміною як енергетичних умов прийому, так і довжини сигналу, що свідчить про системний характер отриманого результату.

Відсутність перекриття довірчих інтервалів у зоні низьких значень SNR додатково підтверджує статистичну значущість відмінностей між порівнюваними класами послідовностей.

Таким чином, застосування методу ЛПτ з оптимізацією параметра зсуву забезпечує зменшення ймовірності помилки виявлення сигналу в усьому дослідженому діапазоні SNR та довжин послідовностей, що узгоджується з результатами ентропійного аналізу, наведеними в підрозділі 3.3.

Висновки за розділом 3

1. Досліджено проблему використання ентропійних характеристик для оцінювання структурної стійкості ансамблів складних сигналів. Проведено порівняльну оцінку перестановочної, нечіткої, ентропії розсіювання та ентропії вибірки, що дозволило встановити їх чутливість до зміни параметра τ та виявити обмеження використання окремих ентропій як самостійного критерію оптимізації часової організації ансамблю.

2. Експериментально верифіковано ентропійний метод оцінювання структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів, що базується на сукупному багатомасштабному аналізі ентропії вибірки, перестановочної ентропії, нечіткої ентропії та ентропії розсіювання. Результати моделювання показали, що мінімум інтегрального критерію K (τ) відповідає області узгодженого зниження ентропійних показників у середньому на 12–35 % залежно від масштабу аналізу. Це створює кількісну основу для оцінювання

структурної стійкості сигналів у когнітивних телекомунікаційних системах під час спектрального моніторингу в умовах низького SNR.

3. Запропоновано підхід до вибору параметра зсуву τ на основі мінімізації інтегрального ентропійного критерію, що забезпечує формування структурно впорядкованого стану ансамблю сигналів. У точці $\tau^* \approx 0{,}618$ зафіксовано зниження перестановочної ентропії до 47,4 %, нечіткої ентропії до 30,0 %, ентропії розсіювання до 15,7 % та ентропії вибірки до 13,2 % порівняно з неоптимальними значеннями параметра. Це дозволяє використовувати критерій $K(\tau)$ як індикатор узгодженого налаштування параметрів сигналів з метою забезпечення стабільності їх часової структури в завадовому середовищі.

5. Математично обґрунтовано ефективність запропонованого методу за допомогою статистичного аналізу ймовірності помилки виявлення сигналу з використанням 95 % довірчих інтервалів, що показало відсутність їх перекриття при відношенні сигнал/шум SNR = –10…–5 dB та підтвердило статистично значущу відповідність між зменшенням ентропійної складності часової структури ансамблю та зменшенням ймовірності помилки виявлення сигналу. Це підтверджує можливість застосування інтегрального ентропійного критерію як прогностичного показника достовірності виявлення сигналів у когнітивних телекомунікаційних системах.

4. Проведено порівняльне експериментальне оцінювання завадостійкості ансамблів сигналів, яке встановило зменшення ймовірності помилки виявлення до 41,7 % (P = 257, SNR = 0 dB) та до 37,9 % (P = 513, SNR = –5 dB) відносно базових конструкцій. Узгодженість цих результатів з ентропійним аналізом підтверджує доцільність використання інтегрального ентропійного критерію для обґрунтованого вибору параметрів сигналів у задачах узгодженого керування частотними ресурсами та зниження частоти хибних рішень у когнітивних телекомунікаційних системах.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБКА МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНОГО ПІДХОДУ

Попередні розділи були присвячені дослідженню кореляційних та структурних властивостей ансамблів складних сигналів, а також методам їх формування на основі перестановок часових інтервалів та ентропійного аналізу. Отримані результати показали, що зміна параметрів часової організації сигналів суттєво впливає на кореляційні характеристики сигнального ансамблю та структурну впорядкованість сигналів.

Формування ансамблів складних сигналів потребує одночасного врахування кількох взаємопов’язаних характеристик, а саме: зменшення взаємної кореляції між сигналами, зниження рівня бічних пелюсток кореляційних функцій, забезпечення рівномірного розподілу енергії та збереження структурної стійкості ансамблю. Одночасне врахування цих вимог формує задачу багатокритеріальної оптимізації. Для таких задач традиційні детерміновані методи є недостатньо ефективними, оскільки вони не дозволяють дослідити весь простір можливих часових конфігурацій сигналів.

Для розв’язання подібних задач застосовуються еволюційні алгоритми багатокритеріальної оптимізації, які дозволяють досліджувати простір рішень та формувати фронт Парето оптимальних конфігурацій сигналів, зокрема алгоритми типу MOEA/D [52, 54, 77, 117].

Проте застосування існуючих еволюційних алгоритмів у задачах формування ансамблів складних сигналів має низку обмежень. Зокрема, при оптимізації часових конфігурацій сигналів можуть виникати проблеми повільної збіжності, локальних коливань популяції та недостатньої синхронізації між поточною популяцією розв’язків і зовнішнім архівом Парето-оптимальних рішень. Крім того, більшість існуючих алгоритмів не враховують структурну варіативність сигналів, пов’язану з перестановками часових сегментів.

У зв’язку з цим виникає необхідність розробки модифікованого методу багатокритеріальної оптимізації, який поєднує механізми еволюційного пошуку з моделлю часових перестановок сигналів та ентропійними критеріями оцінювання їх структурної впорядкованості. Такий підхід дозволяє узгодити процес оптимізації з внутрішньою структурою ансамблю сигналів, одночасно враховуючи кореляційні та ентропійні характеристики, що забезпечує більш ефективне дослідження простору часових конфігурацій.

4.1 Обґрунтування застосування еволюційного підходу до багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів

Проведений аналіз еволюційних алгоритмів багатокритеріальної оптимізації показав, що вони відрізняються принципами формування популяції рішень, підтримання різноманітності та способами побудови фронту Парето. (табл. 4.1). В наукових дослідженнях [52, 54, 77, 117] обґрунтовано, що найбільш поширеними в задачах багатокритеріальної оптимізації є алгоритми на основі недомінованого сортування популяції та алгоритми декомпозиції задачі. Загальна класифікація еволюційних алгоритмів наведена на рис. 4.1. Порівняльний аналіз еволюційних алгоритмів представлений у табл. 4.1.

Рисунок 4.1 –Класифікація еволюційних методів оптимізації

Таблиця 4.1 – Порівняння еволюційних алгоритмів багатокритеріальної оптимізації [52, 54, 77, 117]

Алгоритм	Тип алгоритму	Принцип формування рішень	Переваги	Недоліки	Доцільність застосування
NSGA-II	Недомінованe сортування	Формування популяції на основі ранжування за Pareto-домінуванням та метрики різноманітності	Добре підтримує різноманітність рішень; стабільне формування фронту Парето	Обчислювальна складність зростає зі збільшенням популяції та кількості критеріїв	Ефективний для задач середньої розмірності
SPEA2	Недомінованe сортування з архівом	Використання зовнішнього архіву елітних рішень для збереження Pareto-оптимальних варіантів	Висока точність відбору; стабільне наближення фронту Парето	Значні витрати пам’яті; складність масштабування	Підходить для задач з невеликою кількістю критеріїв
MOEA/D	Декомпозиційний алгоритм	Розбиття багатокритеріальної задачі на набір підзадач із ваговими коефіцієнтами	Висока масштабованість; швидка збіжність; ефективний обмін інформацією між підзадачами	Потребує налаштування вагових параметрів	Доцільний для задач великої розмірності та складних структурованих об’єктів

Як видно з табл. 4.1, алгоритми на основі недомінованого сортування (NSGA-II, SPEA2) забезпечують ефективне формування фронту Парето та підтримання різноманітності рішень, проте їх обчислювальна складність зростає зі збільшенням кількості критеріїв оптимізації. На відміну від них, алгоритм MOEA/D, що базується на принципі декомпозиції задачі, дозволяє розбити багатокритеріальну задачу на набір підзадач та оптимізувати їх паралельно, що підвищує масштабованість і прискорює процес збіжності.

З огляду на те, що задача формування ансамблів складних сигналів характеризується значною розмірністю простору можливих рішень та необхідністю одночасної оптимізації кількох характеристик сигналів, у даному дослідженні найбільш доцільним є використання декомпозиційного підходу, реалізованого в алгоритмі MOEA/D.

Особливості застосування алгоритму MOEA/D для задач оптимізації ансамблів складних сигналів представлено в табл. 4.2. Вони полягають у можливості представлення різних конфігурацій часових перестановок сигналів як окремих підзадач оптимізації, що дозволяє ефективно досліджувати простір можливих структур ансамблю. При цьому взаємодія між підзадачами забезпечує обмін інформацією між розв’язками та сприяє формуванню збалансованого фронту Парето за вибраними критеріями якості сигналів.

Таблиця 4.2 – Особливості застосування генетичного алгоритму MOEA/D для оптимізації ансамблів складних сигналів

Особливість	Сутність	Реалізація для ансамблів
Декомпозиція багатокритеріальної задачі	Глобальна задача оптимізації розбивається на набір підзадач з ваговими коефіцієнтами	Різні конфігурації часових перестановок сигналів розглядаються як окремі підзадачі оптимізації
Паралельна оптимізація підзадач	Кожна підзадача оптимізується незалежно, але з урахуванням інформації від сусідніх підзадач	Дозволяє одночасно досліджувати різні варіанти структури ансамблю сигналів

Обмін інформацією між сусідніми рішеннями	Підзадачі обмінюються інформацією з найближчими рішеннями у просторі ваг	Забезпечує узгоджене формування ансамблю сигналів з оптимальними характеристиками
Формування фронту Парето	Алгоритм формує множину компромісних рішень для кількох критеріїв оптимізації	Дозволяє одночасно оптимізувати кореляційні властивості, енергетичну рівномірність та структурну впорядкованість сигналів
Масштабованість алгоритму	Алгоритм ефективно працює при великій кількості параметрів і критеріїв	Дає можливість оптимізувати ансамблі сигналів великої розмірності

Як видно з табл. 4.2, декомпозиційна структура алгоритму MOEA/D дозволяє ефективно адаптувати його до задач формування ансамблів складних сигналів, у яких необхідно одночасно оптимізувати кілька характеристик сигналів та досліджувати значний простір можливих часових конфігурацій.

Таким чином, з урахуванням особливостей задачі формування ансамблів складних сигналів доцільним є розроблення модифікованого методу оптимізації на основі алгоритму MOEA/D, який враховує специфіку часової організації сигналів.

4.2 Розробка методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів та алгоритму його реалізації

Обґрунтування доцільності використання декомпозиційного еволюційного алгоритму MOEA/D для задач оптимізації ансамблів складних сигналів довело, що цей підхід ефективно досліджує простір можливих конфігурацій сигналів та забезпечує формування множини компромісних рішень за кількома критеріями якості. Але класичний алгоритм MOEA/D не враховує специфіку задач формування ансамблів складних сигналів, зокрема особливості

їх часової структури та впливу перестановок часових сегментів на кореляційні властивості сигналів. Крім того, при оптимізації таких ансамблів важливим є врахування показників структурної впорядкованості сигналів, які можуть бути оцінені за допомогою ентропійних характеристик.

З врахуванням особливостей запропоновано метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів на основі модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D, у якому механізми еволюційного пошуку поєднуються з моделями часових перестановок сигналів та ентропійними показниками оцінювання структури ансамблю (розділ 2 та розділ 3).

Розроблений метод передбачає:

– формування початкової популяції ансамблів сигналів на основі перестановок часових сегментів;

– оцінювання якості кожного ансамблю за набором критеріїв оптимізації;

– декомпозицію багатокритеріальної задачі на набір підзадач відповідно до принципу алгоритму MOEA/D;

– еволюційне оновлення популяції з використанням операторів селекції, схрещування та мутації;

– формування множини Парето-оптимальних ансамблів сигналів.

Блок-схему алгоритму реалізації методу наведено на рис. 4.2. Алгоритм реалізації запропонованого методу складається з низки послідовних етапів, частина з яких відповідає базовим операціям еволюційних алгоритмів, тоді як окремі етапи реалізують запропоновані модифікації алгоритму MOEA/D під задачі даного дослідження.

1 Етап. Ініціалізація параметрів алгоритму

На початковому етапі задаються основні параметри еволюційного алгоритму, зокрема: розмір популяції N; максимальна кількість поколінь T_{max}; імовірності застосування операторів схрещування P_c та мутації P_m; кількість часових сегментів сигналу n_τ; кількість підзадач декомпозиції L.

Кількість сегментів визначає рівень часової деталізації сигналу, а кількість підзадач відповідає числу варіантів часових перестановок, які розглядаються в процесі оптимізації.

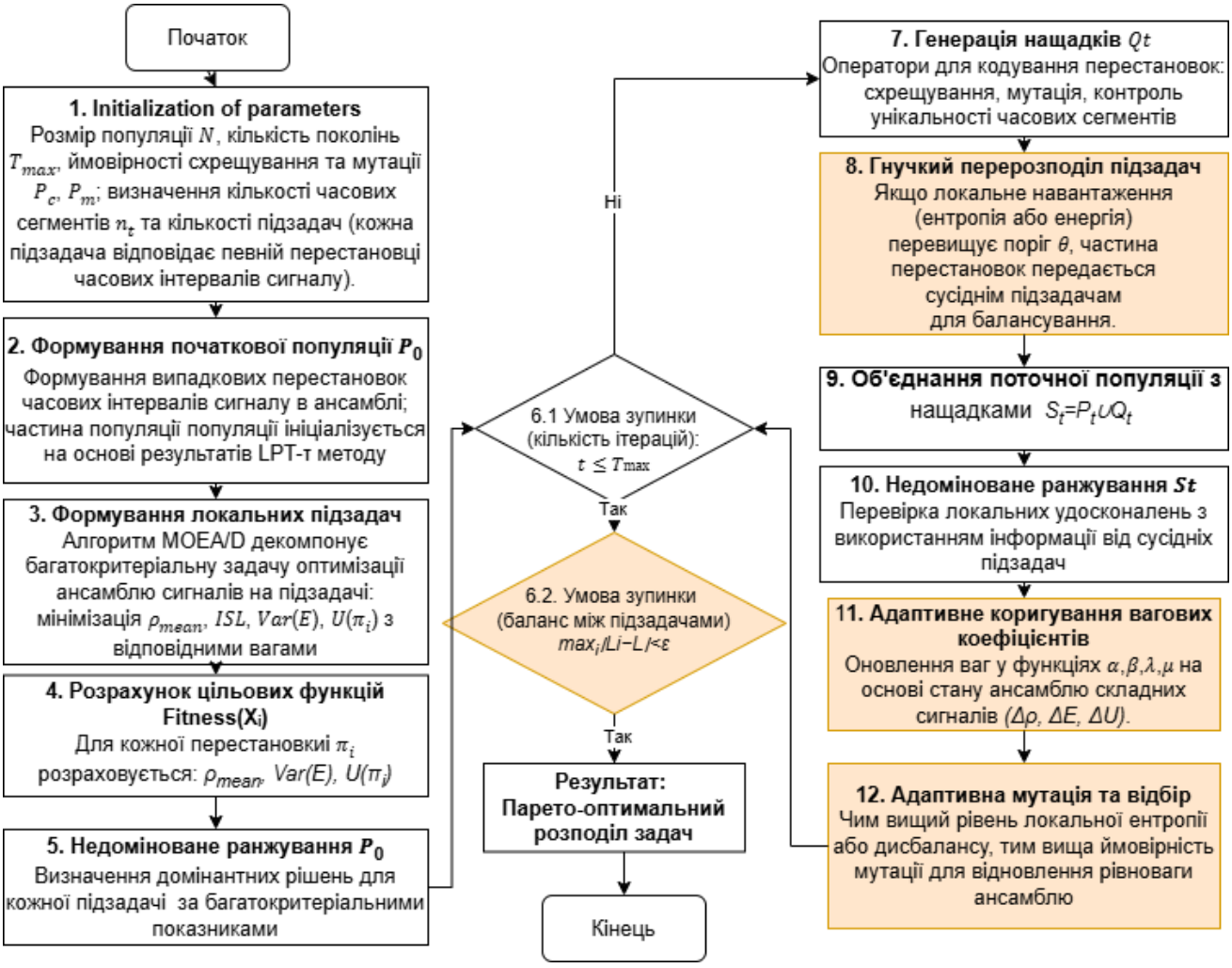


Рисунок 4.2 – Блок схема алгоритму реалізації методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів

Кожна підзадача відповідає певній конфігурації часової перестановки сегментів сигналу та може бути представлена у математичному вигляді:

$$P_0 = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}, \quad \pi_{i=}[t_1, t_2, \dots, t_\tau], i = 1, \dots, N \qquad (4.1)$$

де P_0– початкова популяція можливих конфігурацій ансамблів сигналів; π_i – i-та перестановка часових сегментів сигналу; N – розмір популяції; $t_1, t_2, \dots, t_\tau$ – часові сегменти сигналу; τ – кількість часових сегментів, на які розбивається сигнал.

Кожна особина популяції представляє певну конфігурацію перестановки часових сегментів сигналу, що визначає структуру відповідного сигналу в ансамблі та використовується надалі в процесі багатокритеріальної оптимізації.

2 Етап. Формування початкової популяції

На даному етапі формується початкова популяція можливих конфігурацій ансамблів сигналів. Для забезпечення ефективного дослідження простору можливих рішень використовується комбінований підхід до генерації початкових перестановок часових сегментів сигналу.

Частина популяції формується випадковим чином, що забезпечує різноманітність початкових конфігурацій сигналів. Випадкова генерація перестановок дозволяє охопити широкий спектр можливих структур ансамблю та зменшує ризик передчасної збіжності алгоритму.

Інша частина популяції формується на основі результатів LPT-τ-методу, що використовує впорядкування часових сегментів сигналу відповідно до заданого параметра τ. Такий підхід дозволяє сформувати початкові конфігурації сигналів з більш впорядкованою часовою структурою та кращими початковими кореляційними характеристиками. Формування початкової популяції можна представити у вигляді:

$$P_0 = P_{rand} \cup P_{LPT} \qquad (4.2)$$

де P_{rand} – підмножина випадково згенерованих перестановок; P_{LPT} – підмножина перестановок, сформованих на основі LPT-τ-методу.

Комбінування випадкових і структурованих перестановок дозволяє забезпечити баланс між різноманітністю початкових рішень та структурною

впорядкованістю ансамблю сигналів, що підвищує ефективність подальшої еволюційної оптимізації.

3 Етап. Формування локальних підзадач оптимізації.

На цьому етапі відповідно до принципу алгоритму MOEA/D глобальна багатокритеріальна задача оптимізації ансамблю сигналів декомпонується на множину локальних підзадач. Нехай загальна задача оптимізації характеризується набором критеріїв $F(\pi) = \{f_1(\pi), f_2(\pi), f_3(\pi), f_4(\pi)\}$, де π – конфігурація перестановки часових сегментів сигналу.

У межах декомпозиційного підходу задача розбивається на L підзадач, кожна з яких оптимізується з використанням вагового вектора:

$$w_l = \{w_{l1}, w_{l2}, w_{l3}, w_{l4}\}, \;\; l = 1, \dots, l \tag{4.3}$$

Для забезпечення коректності декомпозиції вагові коефіцієнти нормуються таким чином:

$$\sum_{k=1}^{4} w_{lk} = 1 \tag{4.4}$$

Локальна цільова функція для підзадачі l може бути представлена у вигляді зваженої суми критеріїв:

$$F_l(\pi) = \sum_{k=1}^{n} w_{lk} f_k(\pi) \tag{4.5}$$

У даному дисертаційному дослідженні для оцінювання якості ансамблю сигналів використовується чотири критерії, тому локальна функція оптимізації набуває математичного вигляду:

$$F_l(\pi) = \; w_{l1}\rho_{mean}(\pi) + w_{l2}ISL(\pi) + w_{l3}Var(E) + w_{l4}U(\pi) \tag{4.6}$$

де ρ_{mean} – середній коефіцієнт взаємної кореляції сигналів ансамблю;

ISL –інтегральний рівень бічних пелюсток кореляційної функції сигналів;

$Var(E)$ –дисперсія енергії сигналів ансамблю;

$U(\pi)$ – показник структурної впорядкованості ансамблю сигналів.

На цьому етапі алгоритму реалізації, кожна підзадача оптимізує власну конфігурацію перестановки часових сегментів сигналу. Крім того, між підзадачами забезпечується обмін інформацією через механізм сусідніх вагових векторів, що дозволяє ефективніше досліджувати простір можливих конфігурацій ансамблю сигналів та формувати збалансований фронт Парето.

4 Етап. Обчислення значень цільових функцій ($Fitness$ функцій).

На цьому етапі для кожної особини популяції, що відповідає певній конфігурації перестановки часових сегментів сигналу π_i, обчислюється вектор значень цільових функцій, який характеризує якість сформованого ансамблю складних сигналів.

Багатокритеріальний вектор оцінювання має математичний вигляд:

$$Fitness\ (\pi_i) = [\rho_{mean}(\pi_i), ISL(\pi_i), Var(E)(\pi_i), U(\pi_i)]. \qquad (4.7)$$

Отримані значення використовуються для порівняння різних конфігурацій ансамблю сигналів відповідно до принципу Парето-домінування.

5 Етап. Недомінованe ранжування рішень

На даному етапі здійснюється ранжування отриманих рішень відповідно до принципу Парето-домінування. Нехай задано два рішення π_a та π_b. Рішення π_a домінує над π_b, якщо виконується умова:

$$F_k(\pi_a) \leq F_k(\pi_b), \forall k, \qquad (4.8)$$

та одночасно виконується умова, що хоча б один критерій k відповідає:

$$F_k(\pi_a) < F_k(\pi_b). \qquad (4.9)$$

Згідно першою умови (4.8), рішення π_a не гірше за рішення π_b за всіма критеріями оптимізації, а за другою умовою, є хоча б один критерій, за яким рішення π_a є кращим.

У результаті формується множина недомінованих рішень, що апроксимує фронт Парето для задачі оптимізації ансамблю складних сигналів за визначеними параметрами.

6 Етап. Перевірка умов завершення алгоритму.

На цьому етапі здійснюється перевірка умов завершення еволюційного процесу оптимізації. Алгоритм завершує роботу у випадку виконання однієї з заданих умов зупинки:

Умова 6.1 – це обмеження кількості ітерацій, тобто досягнення максимальної кількості поколінь еволюційного процесу:

$$t \geq T_{max} \tag{4.10}$$

де t – поточний номер ітерації алгоритму; T_{max} – максимальна кількість поколінь.

Умова 6.2 – це досягнення достатнього рівня збалансованості між підзадачами декомпозиції. Для цього оцінюється різниця між значеннями локальних індикаторів якості підзадач:

$$\max_{l} IL_j - IL_k < \varepsilon, \tag{4.10}$$

де IL_j – індикатор якості j-підзадачі; IL_k – індикатор якості сусідніх підзадач; ε – допустимий поріг відхилення.

Якщо виконується хоча б одна з умов завершення, алгоритм завершує роботу та формує фінальну множину недомінованих рішень. У протилежному випадку здійснюється перехід до наступного етапу алгоритму (друга частина рис. 4.2), на якому виконується генерація нових конфігурацій ансамблю складних сигналів.

7 Етап. Генерація нащадків.

На цьому етапі формується нова популяція нащадків Q_t на основі поточної популяції P_t. Генерація нових рішень здійснюється за допомогою операторів схрещування та мутації, адаптованих під метод ЛПτ- перестановок часових інтервалів. Додатково використовується оператор унікальності часових сегментів, який забезпечує відсутність дублювання інтервалів у сформованих реалізаціях сигналів.

Завдяки методу ЛПτ кожен згенерований нащадок зберігає коректну структуру ансамблю сигналів та допустимість перестановок часових інтервалів. У результаті формується популяція Q_t, яка «передається» на наступний етап алгоритму для оцінювання за обраними критеріями оптимізації.

Етапи 8–12 алгоритму (рис. 4.2) реалізують модифікації алгоритму MOEA/D, які полягають у введенні адаптивних механізмів керування процесом оптимізації, що враховують структурні властивості ансамблю складних сигналів, зокрема запропоновано:

– механізм гнучкого перерозподілу підзадач на основі інтегрального ентропійного критерію $K(\pi)$, що дозволяє балансувати обчислювальне навантаження між сусідніми підзадачами та підвищує ефективність дослідження простору можливих конфігурацій ансамблю сигналів;

– адаптивне налаштування вагових коефіцієнтів цільових функцій, завдяки чому забезпечується динамічне коригування пріоритетів оптимізації залежно від поточного стану ансамблю сигналів;

– адаптивну зміну інтенсивності мутації залежно від структурного стану ансамблю сигналів, що дозволяє уникнути передчасної збіжності алгоритму та підвищує різноманітність досліджуваних рішень.

8 Етап. Гнучкий перерозподіл задач

Реалізується механізм гнучкого перерозподілу підзадач між сусідніми підзадачами декомпозиції. Якщо для окремої конфігурації ансамблю сигналів значення інтегрального ентропійного критерію структурної впорядкованості перевищує встановлений поріг θ, частина обчислювального навантаження

передається сусіднім підзадачам. Це дозволяє зменшити локальний дисбаланс у процесі пошуку та підвищити рівномірність дослідження простору можливих рішень.

Умова активації перерозподілу така, це: $К(\pi_l)>\theta_К$, де $К(\pi_l)$ – інтегральний ентропійний критерій структурної впорядкованості для l-тої конфігурації ансамблю складних сигналів, а $\theta_К$ – це порогове значення, після перевищення якого активується механізм перерозподілу.

Етап 9. Об'єднання поточної популяції з нащадками

На цьому етапі виконується об'єднання поточної популяції Pt з популяцією нащадків Qt, сформованою на попередньому етапі. У результаті утворюється розширена популяція рішень $S_t=P_t \cup Q_t$.

Отримана множина S_t використовується для подальшого повторного оцінювання та відбору найбільш ефективних конфігурацій ансамблю сигналів.

Етап 10. Недомінноване ранжування об'єднаної популяції

Виконується повторне недомінноване ранжування об'єднаної популяції S_t відповідно до принципу Парето-домінування та з урахуванням локальних покращень у сусідніх підзадачах. Це дозволяє врахувати не лише поточні значення критеріїв оптимізації, але також і вплив обміну інформацією між підзадачами декомпозиції.

У результаті виконання цього етапу формуються оновлені множини перспективних рішень, які використовуються для подальшої адаптації параметрів алгоритму.

Етап 11. Адаптивне коригування вагових коефіцієнтів

На цьому етапі виконується динамічне оновлення вагових коефіцієнтів α, β, λ, μ, що використовуються у цільових функціях оптимізації. Адаптивне коригування ваг забезпечує узгодження процесу пошуку зі змінами властивостей ансамблю складних сигналів у процесі еволюції.

Адаптивне оновлення коефіцієнтів математично представлено у вигляді функції:

$$\alpha, \beta, \lambda, \mu = \Phi(\Delta\rho, \Delta E, \Delta K), \qquad (4.11)$$

де $\Phi(\cdot)$– правило адаптивного оновлення ваг;

$\Delta\rho$ – зміна кореляційних характеристик ансамблю;

ΔE – зміна енергетичних характеристик;

ΔK – зміна інтегрального ентропійного критерію структурної впорядкованості ансамблю.

Такий механізм дозволяє підвищити чутливість алгоритму до змін стану ансамблю сигналів та забезпечує більш гнучке керування процесом оптимізації.

Етап 12. Адаптивна мутація та налаштування відбору

На цьому етапі реалізується механізм адаптивної зміни інтенсивності мутації та параметрів відбору. Якщо в процесі оптимізації фіксується зростання нестабільності ансамблю, підвищення взаємної кореляції або збільшення значення інтегрального ентропійного критерію структурної впорядкованості, імовірність мутації збільшується. Це дозволяє уникнути передчасної збіжності алгоритму та покращити дослідження простору розв’язків. У загальному вигляді правило адаптивної зміни імовірності мутації виглядає наступним чином:

$$P_m^{t+1} = P_m^t + \gamma\Psi(\mathrm{K}(\pi_l)), \qquad (4.12)$$

де P_m^t – імовірність мутації на t-ій ітерації; γ– коефіцієнт адаптації; $\Psi(\cdot)$ – функція керування інтенсивністю мутації.

В результаті адаптивна мутація сприяє збереженню балансу між дослідженням нових конфігурацій ансамблю та уточненням уже знайдених ефективних рішень.

Після виконання етапів адаптивного керування оновлені рішення передаються на повторну перевірку умов завершення алгоритму, наведених на

етапі 6. Якщо умови завершення не виконуються (6.1 та 6.2), еволюційний цикл продовжується; у протилежному випадку формується фінальна множина Парето-оптимальних рішень.

4.3 Експериментальна оцінка ефективності методу оптимізації ансамблів складних сигналів на основі модифікованого алгоритму MOEA/D

Для перевірки ефективності та стабільності збіжності запропонованого методу оптимізації ансамблів складних сигналів на основі модифікованого MOEA/D було проведено серію порівняльних експериментальних досліджень [125]. Порівнювались три методи формування ансамблів сигналів, а саме:

– метод перестановок часових сегментів ЛПτ (розділі 2);

– класичний алгоритм багатокритеріальної оптимізації MOEA/D;

–запропонований модифікований метод E-LPT-MOEA/D (Entropy-based LPT-Permutation Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition), що поєднує механізм LPT-перестановок з еволюційною оптимізацією.

Оцінка результатів оптимізації виконувалося за показниками, які широко використовуються у задачах багатокритеріальної оптимізації [52, 54, 77, 117]: гіпероб'єм фронту Парето I_H, інвертована генераційна відстань I_{GD} та відхилення кореляції $\Delta\rho$.

Показник гіпероб'єму фронту Парето I_H показує об'єм області простору критеріїв, який покривається множиною отриманих недомінованих рішень відносно заданої опорної точки. Збільшення значення I_H доводить підвищення якості фронту Парето та про здатність алгоритму знаходити більш оптимальні компромісні рішення між критеріями оптимізації.

Інвертована генераційна відстань I_{GD} використовується для оцінювання близькості отриманого набору рішень до еталонного фронту Парето. Невеликі значення I_{GD} відповідають кращій збіжності алгоритму та більш рівномірному покриттю області оптимальних рішень.

Показник відхилення кореляції $\Delta\rho$ використовується для оцінки ступеня відхилення середнього коефіцієнта взаємної кореляції сигналів ансамблю від його цільового або мінімального значення. Зменшення значення $\Delta\rho$ свідчить про кращі кореляційні характеристики сформованого ансамблю складних сигналів.

Експериментальні дослідження проводилися у двох режимах оцінювання: нормованому та абсолютному, що дозволило оцінити як відносну ефективність алгоритму, так і його результативність у реальному масштабі параметрів ансамблів складних сигналів.

Результати порівняльного аналізу наведено у табл. 4.3 та табл. 4.4. На рис. 4.3, де показано характер збіжності порівнюваних алгоритмів.

В таблицях, у нормованому режимі (τ=0,3) показники гіпероб'єму I_H, інвертованої генераційної відстані I_{GD} та відхилення кореляції $\Delta\rho$ були приведені до інтервалу [0,1], що дозволило порівнювати ефективність алгоритмів незалежно від енергетичних параметрів сигналів та розміру ансамблю.

Таблиця 4.3 – Порівняння ефективності методів у нормованому режимі

Метод	I_H(сер)	I_H(σ)	I_{GD}(сер)	I_{GD}(σ)	$\Delta\rho$(сер)	$\Delta\rho$(σ)
ЛПτ	0,523	0,010	0,412	0,012	0,097	0,006
MOEA/D	0,607	0,009	0,308	0,009	0,061	0,004
E-LPT-MOEA/D	0,683	0,007	0,259	0,007	0,042	0,003

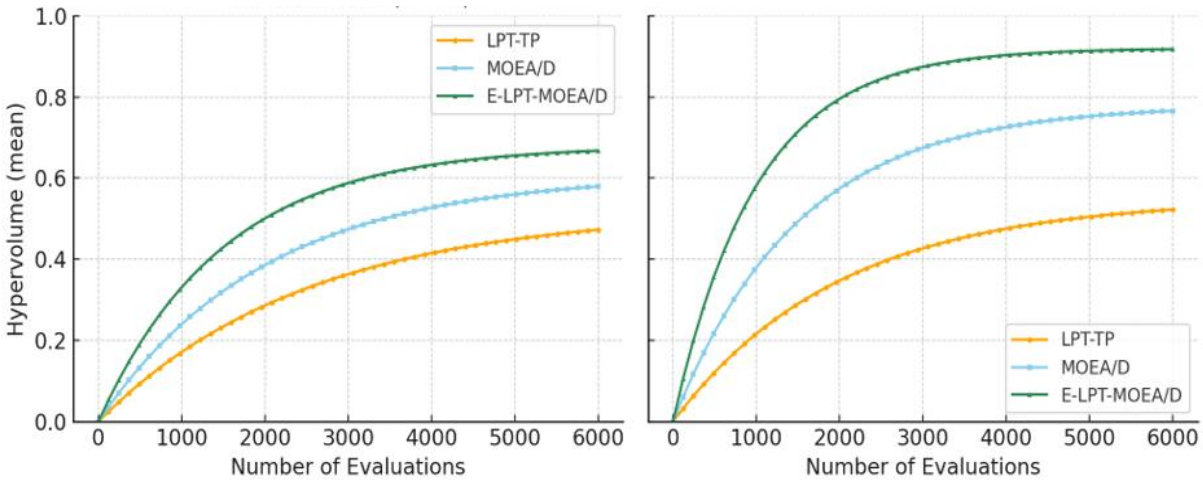
Таблиця 4.4 – Порівняння ефективності методів в абсолютному режимі

Метод	I_H(сер)	I_H(σ)	I_{GD}(сер)	I_{GD}(σ)	$\Delta\rho$(сер)	$\Delta\rho$(σ)
ЛПτ	0,5500	0,0112	0,3950	0,0108	0,0890	0,0051
MOEA/D	0,7800	0,0086	0,2800	0,0081	0,0570	0,0038
E-LPT-MOEA/D	0,9200	0,0079	0,2400	0,0073	0,0400	0,0029

*Скорочення: сер – середнє значення, σ – стандартне відхилення.

Отримані результати експериментального моделювання (табл. 4.3, 4.4, рис. 4.3) показують, що в обох режимах модифікований еволюційний алгоритм

E-LPT-MOEA/D має найбільшу стабільну збіжність У нормованому режимі його ефективність за показником гіпероб'єму фронту Парето IH перевищує метод ЛПτ на 30,6 %, а класичний алгоритм MOEA/D – на 12,5 %.



Нормалізований режим (τ=0,3) Абсолютний режим

Рисунок 4.3 – Порівняння збіжності показника гіпероб'єму фронту Парето у нормованому та абсолютному режимах

В абсолютному режимі алгоритм забезпечує значення показників IH=0,92, IGD=0,24 та $\Delta\rho$=0,04, що відповідає підвищенню значення гіпероб'єму на 67,3 % порівняно з методом ЛПτ та на 17,9 % порівняно з алгоритмом MOEA/D.

Результати моделювання обґрунтовують, що інтеграція механізму LPT-перестановок часових сегментів сигналів з декомпозиційним принципом алгоритму MOEA/D у межах модифікованого еволюційного методу оптимізації забезпечує стабільну збіжність алгоритму та низьку чутливість до змін енергетичних та структурних характеристик ансамблю сигналів.

Для більш детального дослідження динаміки збіжності алгоритму було проведено експерименти, спрямовані на аналіз зміни різниці гіпероб'єму між зовнішнім архівом рішень A та поточною робочою популяцією P. Експериментальний показник визначався за формулою:

$$\Delta H = H_f(A) - H_f(P), \qquad (4.13)$$

де $H_f(A)$ – гіпероб'єм зовнішнього архіву, що містить Парето-оптимальні рішення, а $H_f(P)$ – гіпероб'єм поточної робочої популяції.

Цей показник характеризує ступінь синхронізації між архівом оптимальних рішень і поточною популяцією під час процесу еволюційної оптимізації. На відміну від інтегральних показників якості, таких як I_H або I_{GD}, які оцінюють результат оптимізації після завершення алгоритму, величина ΔH дозволяє аналізувати динаміку процесу збіжності на різних етапах еволюційного пошуку.

Невеликі значення ΔH свідчать про ефективну узгодженість між робочою популяцією та архівом Парето-оптимальних рішень, що забезпечує стабільне підвищення якості рішень та зменшення коливань між поколіннями. Значні коливання ΔH доводять наявність дисбалансу процесу пошуку, коли оновлення популяції відбувається недостатньо узгоджено з оновленням архіву, що призводить до уповільнення збіжності або передчасної стабілізації алгоритму.

Узагальнені результати аналізу динаміки показника ΔH для досліджуваних методів наведено у табл. 4.5 та на рис. 4.4.

Для порівняння було змодельовано чотири експериментальні сценарії з різними значеннями відношення сигнал/шум SNR=10–25 та параметра часової сегментації τ=0,3–1,0, що дозволяє відтворити різні умови функціонування, характерні для когнітивних телекомунікаційних середовищ.

Кожна крива на рис. 4.4 відображає еволюцію показника ΔH у процесі генераційної оптимізації для трьох алгоритмів: E-LPT-MOEA/D, MOEA/D та LPT-TP. Початкова ділянка графіків відповідає швидкому зростанню різниці між зовнішнім архівом і популяцією, що пов'язано з розширенням простору пошуку. Подальші коливання свідчать про синхронізацію процесів дослідження та уточнення розв'язків.

Таблиця 4.5 – Динаміка зміни Δ*H* для E-LPT-MOEA/D, MOEA/D та ЛПτ

Умови експерименту	Метод	Макс. ΔH	ΔH після 500 поколінь	Покоління до 95 % максимуму
a) τ = 0,3, SNR = 10 dB	LPT-TP	0,0221	0,0203	170
	MOEA/D	0,0186	0,0172	130
	E-LPT-MOEA/D	0,0158	0,0151	90
b) τ = 0,5, SNR = 15 dB	LPT-TP	0,0244	0,0229	180
	MOEA/D	0,0203	0,0187	150
	E-LPT-MOEA/D	0,0172	0.0164	100
c) τ = 0,7, SNR = 20 dB	LPT-TP	0,0200	0,0186	190
	MOEA/D	0,0161	0,0150	150
	E-LPT-MOEA/D	0,0132	0,0127	110
d) τ = 1,0, SNR = 25 dB	LPT-TP	0,0181	0,0170	200
	MOEA/D	0,0142	0,0136	160
	E-LPT-MOEA/D	0,0118	0,0113	120

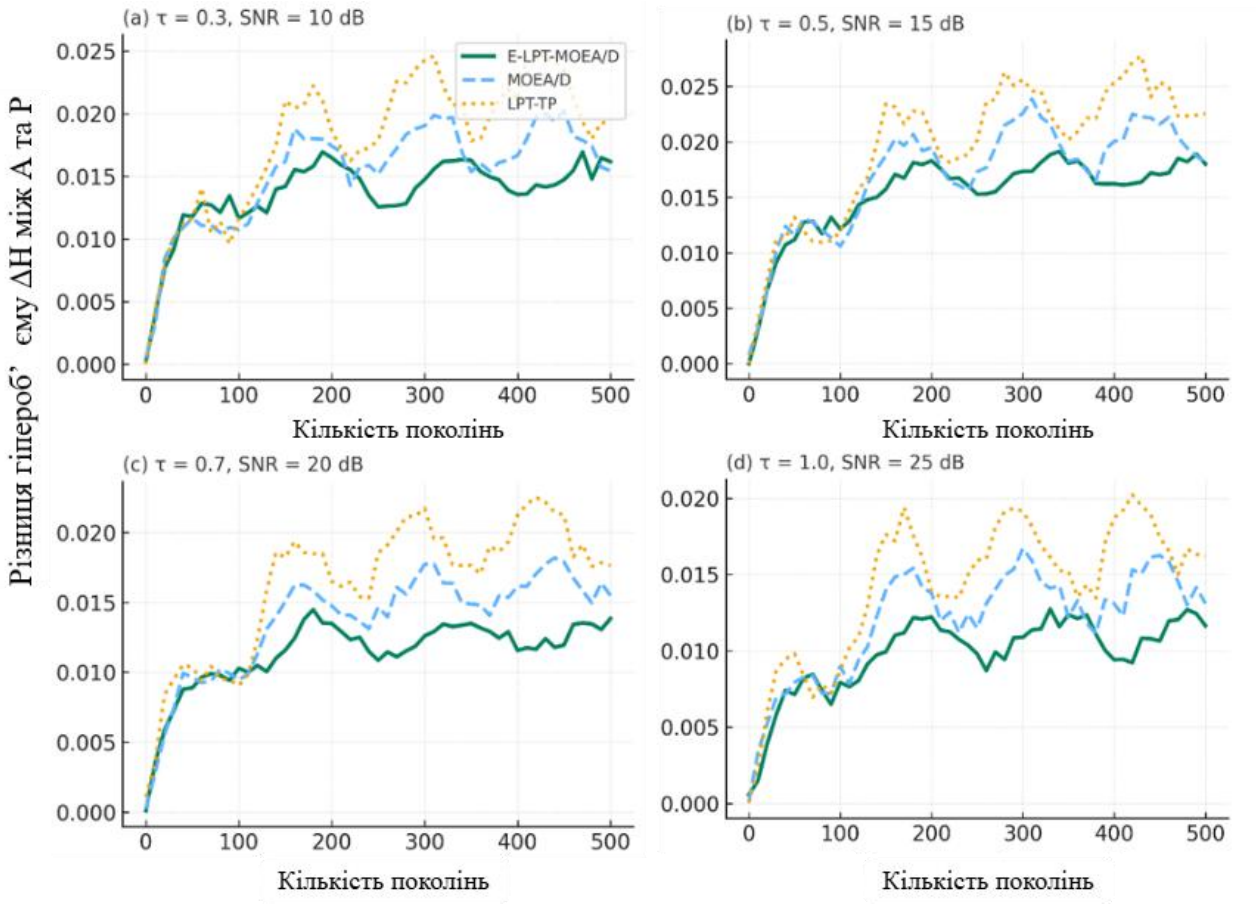


Рисунок 4.4 – Динаміка зміни Δ*H* для методів за різних τ та SNR

Як показують результати, наведені у табл. 4.5 та на рис. 4.4, запропонований алгоритм E-LPT-MOEA/D має швидшу та більш плавну збіжність порівняно з алгоритмами MOEA/D та LPT-TP у всіх експериментальних умовах. При τ=0,3 та SNR=10 dB запропонований метод досягає 95 % від максимального значення ΔH за 90 генерацій, тоді як для методів MOEA/D та LPT-TP це потребує відповідно 130 та 170 генерацій. Це відповідає прискоренню збіжності на 30,77 % порівняно з MOEA/D та на 47,06 % порівняно з LPT-TP.

Аналогічна тенденція спостерігається і при вищих рівнях шуму. Модифікований метод еволюційної оптимізації забезпечує менші фінальні значення ΔH (0,011–0,016) та нижчу амплітуду коливань (зменшується на 15,2–24,8% відповідно, порівняно з базовими алгоритмами), що свідчить про підвищену внутрішню стабільність методу та ефективнішу синхронізацію між популяцією рішень і зовнішнім архівом.

Наступним етапом дослідження є аналіз механізму взаємодії підзадач оптимізації із зовнішнім архівом з метою визначення, чи обумовлена підвищена швидкість збіжності алгоритму більш узгодженим обміном інформацією між ними. Така взаємодія забезпечує стабільне формування фронту Парето-оптимальних рішень у процесі ітераційної оптимізації (рис. 4.5).

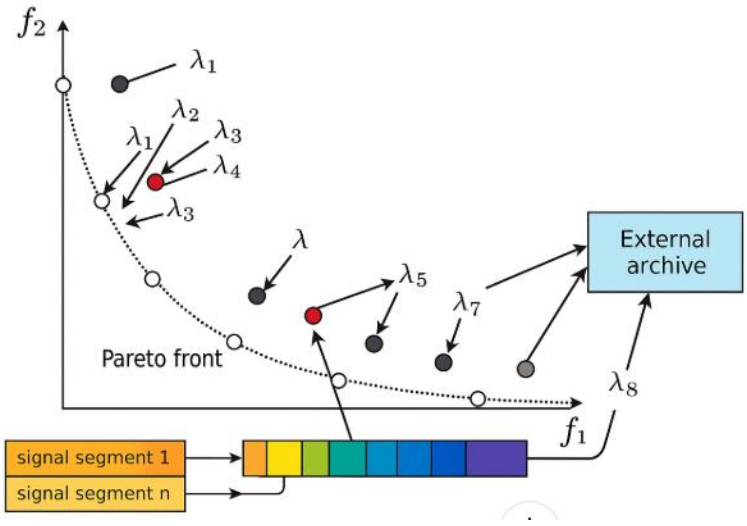


Рисунок 4.5 – Схема формування фронту Парето в алгоритмі MOEA/D

На рис. 4.5 схематично показує взаємодію підзадач λ_1–λ_8 з зовнішнім архівом A у процесі еволюційної багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів. Зовнішній архів зберігає поточну множину Парето-оптимальних ансамблів сигналів, які формуються відповідно до двох критеріїв оптимізації: відхилення енергії сигналу f_1 та дисперсії взаємної кореляції f_2.

Підзадачі отримують зворотний зв'язок від архіву у вигляді інформації про різноманітність та якість поточних розв'язків, що дозволяє їм динамічно перебудовувати перестановки часових сегментів сигналів τ_1–τ_6. В результаті зовнішній архів спрямовує процес пошуку до тих ділянок фронту Парето, де спостерігається дефіцит розв'язків, забезпечуючи:

– збалансований розподіл перестановок часових сегментів сигналів;

– зменшення відхилення енергетичних характеристик сигналів;

– стабілізацію структурної впорядкованості ансамблю.

Таким чином, метод E-LPT-MOEA/D поєднує інформаційний зворотний зв'язок зовнішнього архіву з внутрішнім механізмом часових перестановок сигналів, що підвищує адаптивність методу та забезпечує більш рівномірне покриття фронту Парето.

Кількісні характеристики впливу зовнішнього архіву на процес оптимізації наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Характеристики взаємодії елементів алгоритму E-LPT-MOEA/D у процесі оптимізації ансамблів складних сигналів

Елемент взаємодії	Роль у процесі оптимізації	Очікуваний ефект	Кількісний показник
Зовнішній архів A	Збереження Парето-оптимальних ансамблів та передача інформації про різноманітність розв'язків підзадачам	Підвищення різноманітності рішень	Δρ↓35–40 %
Підзадачі λ_1 –λ_8	Генерація часткових перестановок часових сегментів сигналів	Збалансований внесок підзадач у пошук	Активність ↑42–78 %

Перестановки сегментів τ_1–τ_6	Локальна перебудова часової структури сигналів з урахуванням зворотного зв'язку архіву	Зменшення відхилення енергії	Var(E)↓ 30–35 %
Потік зворотного зв'язку	Передача інформації про недостатньо досліджені області фронту Парето	Спрямований пошук та уникнення локальних мінімумів	I_{GD}↓25–30 %
Фронт Парето F*	Формування множини збалансованих ансамблів сигналів	Підвищення стабільності та завадостійкості	I_H ↑12–15 %

*Примітка. Наведені інтервали значень – це зміна відповідних показників у різних умовах (τ=0,3–1,0, SNR=10–25 dB).

Наступним етапом дослідження є оцінка внутрішньої стабільності та координації процесу оптимізації, тобто кількісне визначення рівномірності внеску окремих підзадач у формування фронту Парето та аналіз еволюції їх активності в умовах стохастичних збурень. Для цього протягом еволюційного процесу здійснювався моніторинг поведінки підзадач λ_1–λ_8, а також статистичний аналіз кількості недомінованих рішень, сформованих кожною підзадачею та доданих до зовнішнього архіву (табл. 4.7, рис. 4.6).

У табл. 4.7 наведено статистичні характеристики внеску окремих підзадач λ_i у формування множини недомінованих рішень у зовнішньому архіві. Показник активних підзадач (%) характеризує частку підзадач, які сформували принаймні одне недомінуване рішення протягом еволюційного процесу. Середній внесок визначає середню кількість недомінованих рішень, доданих однією підзадачею до архіву. Стандартне відхилення σ та коефіцієнт варіації CV характеризують нерівномірність внеску підзадач: менші значення цих показників свідчать про більш збалансований розподіл їх активності в процесі оптимізації. Останній стовпчик табл. 4.7 відображає зміну показників для E-LPT-MOEA/D відносно базового MOEA/D. Значення у процентних

пунктах (п.п.) характеризують приріст частки активних підзадач, тоді як відсоткове зменшення σ відображає зниження варіації їх внеску та підвищення рівномірності розподілу обчислювального навантаження між підзадачами.

Таблиця 4.7 – Підзадачі та їх внесок у формування фронту Парето

Умови експерименту	Метод	Активні підзадачі (%)	Сер. внесок	σ	CV (%)	Приріст E-LPT до MOEA/D
a) Cu = 80/R = 800	MOEA/D	41,7	17,2	10,3	59,8	–
	E-LPT-MOEA/D	77,8	25,6	6,1	23,8	+36,1 п.п.; σ ↓ 36 %
b) Cu = 100/R = 1000	MOEA/D	45,2	19,0	9,8	51,6	–
	E-LPT-MOEA/D	79,3	26,9	6,3	23,4	+34,1 п.п.; σ ↓ 35 %
c) c = 200/σ = 2	MOEA/D	43,8	15,4	8,7	56,5	–
	E-LPT-MOEA/D	75,1	22,7	5,9	26,0	+31,3 п.п.; σ ↓ 32 %
d) c = 300/σ = 2	MOEA/D	39,5	16,1	9,9	61,5	–
	E-LPT-MOEA/D	78,0	24,8	6,2	25,0	+38,5 п.п.; σ ↓ 36 %

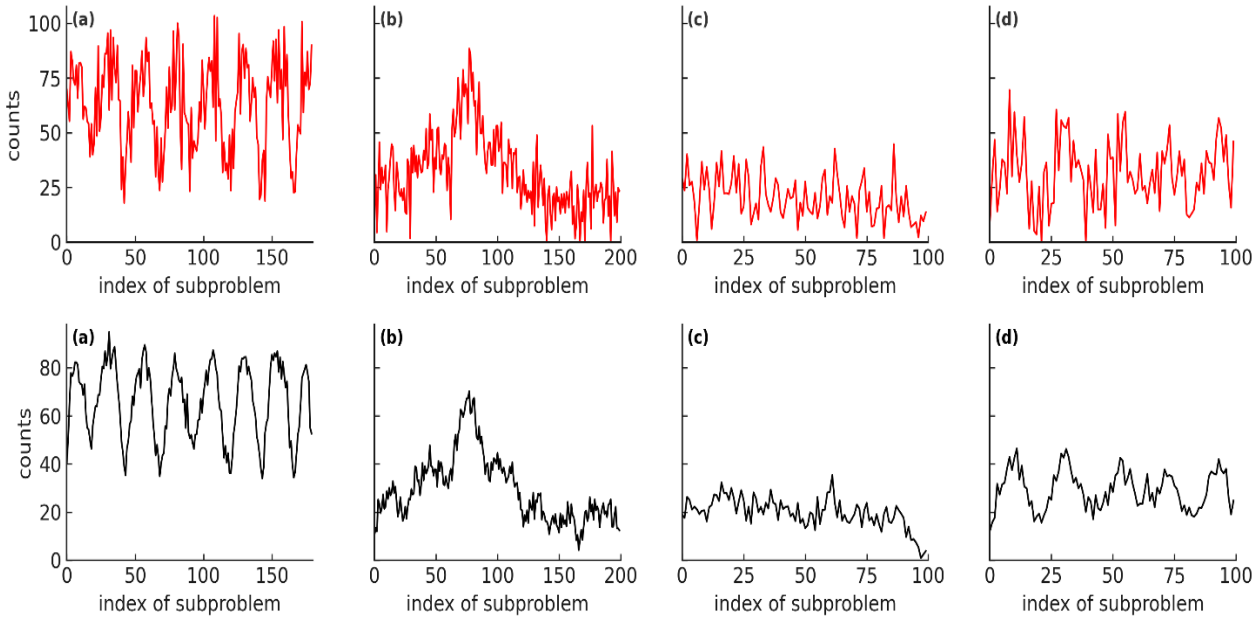


Рисунок 4.6 – Розподіл недомінованих рішень (верхній ряд – MOEA/D, нижній – E-LPT-MOEA/D)

Як видно з рис. 4.6, для базового алгоритму MOEA/D (верхній ряд графіків) характерна нерівномірна активність підзадач, що проявляється у вигляді ізольованих піків та інтервалів низької активності. Така поведінка свідчить про локалізацію пошуку у вузьких діапазонах параметрів і, як наслідок, зменшення різноманітності конфігурацій ансамблю сигналів.

На відміну від цього, модифікований алгоритм E-LPT-MOEA/D (нижній ряд графіків) має більш плавні та рівномірні профілі активності підзадач, що вказує на кращу координацію між підзадачами та більш стабільне поширення кращих рішень у популяції.

Кількісний аналіз результатів (табл. 4.7) експериментально показав, що частка активних підзадач зростає з 41,7 – 45,2 % для алгоритму MOEA/D до 75,1 – 79,3 % для E-LPT-MOEA/D, що відповідає приросту 31,3 – 38,5 п.п. Одночасно стандартне відхилення внеску підзадач зменшується на 32 – 36 %, що свідчить про більш рівномірний розподіл їх активності та підвищення стійкості процесу багатокритеріальної оптимізації.

Висновки за розділом 4

1. Обґрунтовано доцільність застосування еволюційного підходу до багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів, оскільки задача їх формування потребує одночасного врахування кількох взаємопов’язаних критеріїв, а саме: зменшення взаємної кореляції сигналів, зниження інтегрального рівня бічних пелюсток, забезпечення енергетичної рівномірності та збереження структурної впорядкованості ансамблю. На основі порівняльного аналізу встановлено, що для задач великої розмірності та складних структурованих об’єктів найбільш доцільним є використання декомпозиційного алгоритму MOEA/D.

2. Розроблено метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів на основі модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D, у якому поєднано декомпозиційний принцип багатокритеріальної оптимізації, механізм

LPT-τ-перестановок часових сегментів сигналів та ентропійно-орієнтоване оцінювання структурної впорядкованості ансамблю.

3. Розроблено алгоритм реалізації запропонованого методу та модифікації класичного алгоритму MOEA/D, які, на відміну від базового варіанта, враховують специфіку часової організації сигналів. До таких модифікацій належать: гнучкий перерозподіл підзадач на основі інтегрального ентропійного критерію $K(\pi)$, адаптивне коригування вагових коефіцієнтів цільових функцій та адаптивна зміна інтенсивності мутації залежно від структурного стану ансамблю.

4. Проведено експериментальне моделювання ефективності запропонованого методу у нормованому та абсолютному режимах оцінювання. Встановлено, що в нормованому режимі значення гіпероб'єму фронту Парето для методу E-LPT-MOEA/D зростає на 30,6 % порівняно з методом ЛПτ та на 12,5 % порівняно з класичним MOEA/D. В абсолютному режимі метод показує значення показників: I_H=0,92, I_{GD}=0,24 та $\Delta\rho$=0,04, що відповідає збільшенню гіпероб'єму на 67,3 % відносно методу ЛПτ та на 17,9 % відносно MOEA/D.

5. Експериментально підтверджено підвищення динамічної стійкості та узгодженості процесу оптимізації при використанні методу E-LPT-MOEA/D. За показником різниці гіпероб'єму ΔH встановлено, що при τ=0,3 та SNR=10 dB метод досягає 95 % від максимального значення ΔH за 90 генерацій, тоді як для MOEA/D та LPT-TP це потребує відповідно 130 та 170 генерацій, що відповідає прискоренню збіжності на 30,77 % та 47,06 %. Додатково встановлено, що частка активних підзадач зростає на 31,3–38,5 п.п., а стандартне відхилення їх внеску зменшується на 32–36 %, що свідчить про більш рівномірний розподіл активності підзадач, кращу синхронізацію із зовнішнім архівом та вищу стійкість процесу багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних методів формування та оптимізації ансамблів складних сигналів, в результаті чого визначено основні фактори, що обмежують їх ефективність, зокрема високий рівень взаємної кореляції, нерівномірність покриття простору перестановок та недостатня структурна впорядкованість сигналів в умовах складних завад. Досліджено критерії оцінювання кореляційних властивостей ансамблів сигналів та підходи до оптимізації їх параметрів для застосування у когнітивних телекомунікаційних системах, що дозволило обґрунтувати недоліки та обмеження існуючих методів та сформулювати наукові задачі дослідження.

2. Удосконалено метод формування ансамблів складних сигналів у часовій області на основі ЛПτ-послідовностей за рахунок використання параметризованої індексної перестановки часових інтервалів, що забезпечує зниження взаємної кореляції та розширення обсягу сигнального ансамблю. Проведене експериментальне моделювання ефективності запропонованого методу показало зниження пікового рівня бічних пелюсток автокореляційної функції на 51,2–82,1 % порівняно з послідовностями Франка та на 12,3–27,4 % порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією, що сприяє зменшенню рівня міжканальної інтерференції.

3. Розроблено алгоритм реалізації методу параметризованих ЛПτ-перестановок часових інтервалів для формування ансамблів складних сигналів; проведено порівняльне експериментальне дослідження його ефективності за кореляційними характеристиками сформованих сигналів. Встановлено, що застосування алгоритму забезпечує формування ансамблів сигналів з обсягом, що перевищує класичні підходи в 10^6–10^{20} разів, а також дає приріст в діапазоні 3,8–9,6 % в залежності від довжини послідовності (P=40–9000) порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією, що підтверджує підвищення ефективності формування ансамблів сигналів з заданими кореляційними властивостями.

4. Удосконалено ентропійно-орієнтований метод оцінювання структурної впорядкованості ансамблів складних сигналів за рахунок введення інтегрального ентропійного критерію, що поєднує показники перестановочної, вибіркової та нечіткої ентропії для кількісної оцінки структурної стійкості сигналів у складному завадовому середовищі. Експериментально доведено, що запропонований метод дозволяє кількісно оцінювати структурну стійкість ансамблів та визначати оптимальні параметри їх часової організації. Результати моделювання підтвердили зниження ентропійної складності сигналів на 12,0–35,0 %, що обґрунтовує підвищення структурної впорядкованості ансамблів сигналів та їх стійкості до впливу завад.

5. Розроблено алгоритм та програмну реалізацію ентропійно-орієнтованого методу оцінювання структурної впорядкованості ансамблів сигналів і експериментально досліджено його ефективність за показниками структурної стійкості та достовірності виявлення сигналів. Реалізовано механізм вибору оптимального параметра часової організації ансамблю на основі мінімізації інтегрального ентропійного критерію, застосування якого забезпечує зниження ймовірності помилки виявлення сигналів до 41,7 % при SNR = 0 dB та до 37,9 % при SNR = –5 dB порівняно з методом часових перестановок з енергетичною оптимізацією, що підвищує достовірність виявлення сигналів в умовах завад.

6. Удосконалено метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів у часовій області на основі модифікованого еволюційного алгоритму MOEA/D шляхом використання ЛП-τ-перестановок часових сегментів та ентропійних характеристик структури сигналів. Проведено верифікацію методу за сукупністю кореляційних, енергетичних та ентропійних критеріїв, що показало збільшення гіпероб’єму фронту Парето на 30,6 % порівняно з базовим методом та на 12,5 % порівняно з класичним MOEA/D, що забезпечує узгодження зазначених характеристик і формування більш збалансованих ансамблів складних сигналів.

7. Розроблено модифікацію еволюційного алгоритму MOEA/D (E-LPT-

MOEA/D) для реалізації методу багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів, яка базується на інтеграції ЛП-τ-перестановок часових сегментів та ентропійно-орієнтованого керування процесом пошуку. Створено програмну реалізацію та експериментально оцінено ефективність алгоритму за показниками формування фронту Парето та кореляційних характеристик сигналів. Встановлено, що запропонований алгоритм забезпечує прискорення збіжності на 30,77 % порівняно з MOEA/D та на 47,06 % порівняно з ЛПτ-підходом, що дозволяє підвищити ефективність формування ансамблів сигналів в умовах змінних значень SNR, довжини послідовностей та параметрів часової організації.

Перспективи подальших досліджень полягають у розвитку підходу багатокритеріальної оптимізації на основі E-LPT-MOEA/D з розширенням системи критеріїв за рахунок ентропійних та структурних показників та їх інтеграцією у задачі реконструкції сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про електронні комунікації» №1089-IX від 16.12.2020, https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20.

2. Закон України «Про радіочастотний ресурс України» №1770-III, https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1770-14.

3. Альошин Г.В., Панченко С.В., Приходько С.І. Проблеми теорії телекомунікаційних систем та мереж. Харків: УкрДАЗТ, 2018. 260 с.

4. Васильківський , М. В., Грабчак, Н. В., Бриль, Д. Р., & Олійник , А. О. (2025). Сценарії застосування технологій 6G-IoT в інфокомунікаційних мережах нового покоління. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (60), 358-368. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-38.

5. Горпініч , І., Дубровін , В., & Дейнега , . Л. (2025). Поведінкові методи виявлення DDOS атак в мережах: програмна реалізація ентропійного підходу. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, (2(84), 98-102. https://doi.org/10.30748/zhups.2025.84.11.

6. Дубровін В. І., Твердохліб Ю. В. Дослідження змін ентропії та енергії на етапах декомпозиції сигналу. Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2013. № 2 (29). С. 54–58.

7. Дюков, І. Алгоритм адаптивного енергетично-циклостаціонарного виявлення шумоподібних сигналів. Міжнародний науковий журнал «Military Science», 2(2), (2024) С. 83-92. https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.2.07.

8. Єлізаренко А.О. Регулювання користуванням радіочастотним спектром в системах залізничного технологічного радіозв'язку / А.О. Єлізаренко, І.О. Єлізаренко // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – №2. – С.25-31 https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307758.

9. Єлізаренко А.О. Уніфікована методика розрахунку зон обслуговування в мережах залізничного технологічного радіозв'язку / А.О. Єлізаренко // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті:

науково-технічний журнал. – Харків: УкрДУЗТ, 2023. – №1. – С.25-31 https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276349.

10. Єлізаренко А. О. Особливості впровадження сучасних цифрових радіотехнологій на мережах зв'язку залізниць / А. О. Єлізаренко, І. О. Єлізаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2018. – № 1. – С. 10-16. http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/4467.

11. Закора О. В. Автоматизовані системи управління та зв'язок: підручник/А. Б. Фещенко, Л. В. Борисова, В. О. Собина, Д. В. Тарадуда, М. О. Демент, І. М. Неклонський. – Х.: НУЦЗУ, 2021. – 288 с.

12. Захаржевський А. Г. Інваріантність системи управління інфокомунікаційної мережі спеціального призначення за умови неповної апріорної інформації // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2023. № 3. С. 411. DOI: 10.31673/2412-4338.2023.030411

13. Індик С.В., Лисечко В.П. Дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області. Збірник наукових праць. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба. 2020. Вип. 4 (66). С.46-50. https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.06.

14. Індик С.В., Лисечко В.П. Метод перестановки інтервалів з врахуванням взаємокореляційних властивостей сегментів// Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020. Вип. 3 (61). С. 128 – 130. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.128.

15. Камєнєва, Ю. В., Федосов С. А., & Новосад, О. В. (2025). Проектування фільтрів у цифровій обробці сигналів. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (61), 249-255. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-34.

16. Козловський В.В., Штомпель М. А., Комар О.М., Лисечко В.П., Дробик В.О. (2023) Розробка методу декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції, 2023 – Національний авіаційний

університет. Наукоємні технології, «Електроніка, телекомунікації та радіотехніка» № 2(58), P. 21-28, 2023 DOI: DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.58.17654.

17. Костиря О. О. , Гризо А. А., Федоров А. В., Лісогорський Б. А., Ушаков С. І. (2025) Метод обчислення і компенсації частотно-фазових спотворень на стику та у фрагментах сигналів з нелінійною частотною модуляцією, Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (100), pp. 51–58, https://doi.org/10.20535/RADAP.2025.100.%25p.

18. Кузниченко В. М. Энтропия состояний цепей Маркова в линейной модели международной торговли / В. М. Кузниченко // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Технический прогресс и эффективность производства. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 58. – С. 14-20. URI: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/28731.

19. Лисечко В.П., Обіход Я.Я., Ковтун І.В., Шувалова Ю.С., Сколота С.В.. Методи віртуалізації і масштабування в мережах безпроводового доступу / // Журнал «Системи управління, навігації та зв'язку». – Вип 3(55) – Полтава. – 2019. — С.171-175. ISSN 2073-7394.

20. Лисечко В.П., Обіход Я.Я., Олефіренко Т.М.. Дослідження ймовірнісного розподілу службових сигналів в когнітивному радіо, Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. - Харків: УкрДАЗТ, Вип. 6. – 2015.– С. 51-54.

21. Лисечко В.П., Обіход Я.Я., Фоменко О.К.. Метод навчання когнітивних радіомереж на основі кіл Маркова. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. - Харків: УкрДАЗТ, Вип. 133. – 2012. – С. 147-154.

22. Методи і моделі метричного оцінювання якості інтелектуальних систем / І. О. Васильєв, С. І. Доценко, О. І. Морозова, В. С. Харченко // Методи та технології забезпечення якості та безпеки інтелектуальних систем : кол. моногр./за ред. В. С. Харченка, О. І. Морозової. – Міністерство освіти і науки

України, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – К. «Видавництво «Юстон», 2023. – 352 с. С. 193-224.

23. Моделі та методи обробки сигналів на фоні корельованих ексцесних процесів (2025) Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (101), С. 6–17. https://doi.org/10.64915/RADAP.2025.101.6-17.

24. Основи будови телекомунікаційних систем: навчальний посібник /І. С. Катеринчук, Д. А. Мул, Р. В. Рачок, Є. В. Прокопенко. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2014. – 156 с.

25. Приходько С.І. Особливості спільної роботи радіостанцій з різним частотним рознесенням каналів / С.І. Приходько, А.О. Єлізаренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2023, №2, С.36-43 https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.28343.

26. Приходько С.І., Штомпель М.А. Дослідження ефективності біоінспірованого методу декодування лінійних блокових кодів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2022. Вип. 3. С. 10–15. https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i3.265529.

27. Радіотехнічні системи залізничного транспорту : навчальний посібник / С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлізаренко, Н. А. Корольова. – Харків : УкрДУЗТ, 2024. – 147 с. http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/26476.

28. Ткачук, В. В., Сацик, О. В., Бортнічук, С. А., & Кошульський , А. В. (2025). Синхронізація та надійність систем зв’язку з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти. Комп’ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (61), 256-263. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-35.

29. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень з телекомунікацій на залізничному транспорті: навчальний посібник/ С.В. Панченко, С.І. Приходько, Л.О. Позднякова, А.О. Єлізаренко. – Харків: УкрДУЗТ, 2016 – 139 с.

30. Телекомунікаційні системи та мережі: навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» /Укладачі: Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. – Тернопіль:Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.

31. Теорія інформації та обробка сигналів: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» /КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю.С. Ямненко, К. С. Клен. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 120 с.

32. Трубчанінова К.А., Крощенко Д.О. Метод попереднього планування безпроводової локальної мережі стандарту IEEE 802.11. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – № 2(25). – С. 27–31, https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i2.206838.

33. Трубчанінова К.А., Серков О.А., Касілов О.В., Лисечко В.П. Теорія інформації та системи безпровідного зв'язку// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково технічний журнал. 2023. № 1(28). С. 19–24. URL: https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276339.

34. Трубчанінова К.А., Князєв В. В., Кравченко В. І., Лазуренко Б. О., Серков О. А. Методи забезпечення електромагнітної сумісності мобільних телекомунікаційних систем зв'язку // Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. Випуск 3(65). С.134 –138. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.134.

35. Штомпель М.А., Комар О. М., Дробик В.О., Лисечко В.П. Розробка програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів. Телекомунікаційні та інформаційні технології, 2023, № 1 (78), С. 74-81. https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.017481.

36. Штомпель М. А., Нестеренко К. С., Міщенко А. В. Оцінювання ефективності біоінспірованого методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. Системи озброєння і військова техніка. 2022. № 1 (69). С. 115-119. https://doi.org/10.30748/soivt.2022.69.13.

37. Якимчук, Н. М., & Лучук, В. В. (2025). Алгоритмічний підхід до вибору кількості та параметрів підсилювачів у WDM магістралях з використанням OptiSystem. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (61), 280-289. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-37.

38. IEEE Std 1900.6-2011. IEEE Standard for Spectrum Sensing Interfaces and Data Structures for Dynamic Spectrum Access and Other Advanced Radio Communication Systems. IEEE, 2011, https://standards.ieee.org/ieee/1900.6/4480.

39. IEEE 802.22 – Wireless Regional Area Networks, https://standards.ieee.org/standard/802_22-2011.html.

40. IEEE 802.15.4 – Low-rate WPAN (IoT), https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html.

41. 3GPP Specifications Portal (LTE, 5G NR), https://www.3gpp.org/specifications.

42. Agarwal M., Jain R.C.Ensemble Empirical Mode Decomposition: An adaptive method for noise reduction// IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), e-ISSN: 2278-2834,p- ISSN: 2278-8735.Volume 5, Issue 5 (Mar. - Apr. 2013), PP 60-65.

43. Ahmed M. U. and Mandic D. P. (2011) Multivariate multiscale entropy: A tool for complexity analysis of multichannel data, Physical Review E, vol. 84, no. 6, pp. 061918, 2011. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.061918.

44. Ahmed, H.Y.; Zeghid, M.; A.Imtiaz, W.; Sharma, T.; Chehri, A.; Fortier, P. Two-Dimensional Permutation Vectors' (PV) Code for Optical Code Division Multiple Access Systems. Entropy 2020, 22, 576, https://doi.org/10.3390/e22050576.

45. Anuar M.S. et al. New design of spectral amplitude coding in OCDMA with zero cross correlation// Optics Communications? Volume 282, Issue 14, 15 July 2009, Pages 2659-2664, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.03.079.

46. Araujo-Simon, Jake. Compositional Nonlinear Audio Signal Processing with Volterra Series. arXiv preprint, 2023. https://arxiv.org/abs/2308.07229.

47. Arena, A., Lacarbonara, W., Marzocca, P.: Post-criticalbehavior of suspension bridges under nonlinear aerody-namic loading. J. Comput. Nonlinear Dyn. (2016). https://doi.org/10.1115/1.403004.

48. Azami H., Fernández A., and Escudero J. (2019) Multivariate multi-scale dispersion entropy of biomedical times series, Entropy, vol. 21, no. 9, pp. 913, 2019. https://doi.org/10.3390/e21090913.

49. Bandt C. and Pompe B. (2002) Permutation entropy: a natural complexity measure for time series,Physical Review Letters, vol. 88, no. 17, p. 174102, 2002. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.174102.

50. Bashkyrov, O. M., Kostyna, O. M., Shyshatskyi, A. V. (2015). Rozvytok intehrovanykh system zviazku ta peredachi danykh dlia potreb Zbroinykh Syl. Ozbroiennia ta viyskova tekhnika, 1, 35–39. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2015_1_7.

51. Baysal YA., Ketenci S., Altas I.H., Kayikcioglu T., (2021). Multi-objective symbiotic organism search algorithm for optimal feature selection in brain computer interfaces. Expert Syst. Appl. 165, 113907. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113907.

52. Bershov, V., Yakymchuk N. The method of forming ensembles of complex signals based on multi-scale decomposition of time intervals at different levels of detail. Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». Телекомунікації та радіотехніка, Луцьк, № 56, 2024. С. 325-334. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-39.

53. Bocciolone, M., Cheli, F., Curami, A., Zasso, A.: Wind measurements on the humber bridge and numerical simulations. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 42, 1393–1404 (1992). https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90147-3.

54. Boiko J., Pyatin I., Eromenko O., Barabash O. Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices. Advances in Science, Technology and Engineering Systems. – 2020. Volume 5, Issue 2, P. 320-327 https://doi.org/10.25046/aj050242.

55. Boiko, J., Druzhynin, V., Buchyk, S., Pyatin, I., Kulko, A.Methodology of FPGA Implementation and Performance Evaluation of Polar Coding for 5G Communications// CEUR Workshop Proceedings, 2024, 3654, P.P. 15–24 (Scopus) https://doi.org/10.2478/ttj-2024-0022.

56. Bondar, A. V., Shumilin, H. O., Ahamova, R. H., & Tulenko, I. M. (2023). Planning of experimental research in the formation of reinforcing protective coatings. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsii, 19(26). https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-23.

57. Cai X., Zhang Q., Fan Z. (2015). An External Archive Guided Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 19(6), 717–731, https://doi.org/10.1109/TEVC.2014.2350995.

58. Chan, H. K., Sun, X., Chung, S.-H. (2019). When should fuzzy analytic hierarchy process be used instead of analytic hierarchy process? Decision Support Systems, 125, 113114. https://doi.org/10.1016/j.dss.2019.113114.

59. Chen W. et al. (2007) Characterization of surface EMG signal based on fuzzy entropy, Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on, vol. 15, no. 2, pp. 266–272, 2007. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.897025.

60. Chen, H. (2018). Evaluation of Personalized Service Level for Library Information Management Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. Procedia Computer Science, 131, 952–958. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.233.

61. Cohen, L. (1989). Time–frequency distributions—A review. Proceedings of the IEEE, 77(7), 941–981. – https://doi.org/10.1109/5.30749.

62. Costa M., Goldberger A. L., and Peng C.-K. (2005) Multiscale entropy analysis of biological signals, Physical Review E, vol. 71, no. 2, p. 021906, 2005. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.021906.

63. Directive (EU) 2018/1972 – European Electronic Communications Code (EECC), https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/1972/oj.

64. Djafari, A.M. (2001). Entropy in signal processing. ArXiv preprint, 2001. – URL: https://arxiv.org/abs/physics/0111021.

65. Dombi J., Vranković Lacković A., Lerga J. A New Insight into Entropy Based on the Fuzzy Operators, Applied to Useful Information Extraction from Noisy Time-Frequency Distributions Mathematics, 2023, 11(3), 505; https://doi.org/10.3390/math11030505.

66. Dudnyk, V., Sinenko, Y., Matsyk, M., Demchenko, Y., Zhyvotovskyi, R., Repilo, I. et al. (2020). Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (2 (105)), 37–47. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301.

67. Fabila-Carrasco J.S., Tan C., and Escudero J. (2022) Permutation entropy for graph signals, IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, vol. 8, pp. 288–300, 2022, https://doi.org/10.1109/TSIPN.2022.3167333.

68. Fan P., Darnell M. Sequence Design for Communications Applications. – Research Studies Press, 1996. – 320 p. ISBN: 978-0863802140.

69. Fan Z., Ma X., Liu F., Qi Y. (2019). MOEA/D with Angle-based Constrained Dominance Principle (ACDP) for Constrained Multi-objective Optimization Problems. Information Sciences, 465, 1-22, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.027.

70. Gödri, I., Kardos, C., Pfeiffer, A., Váncza, J. (2019). Data analytics-based decision support workflow for high-mix low-volume production systems. CIRP Annals, 68 (1), 471–474. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.001.

71. Golomb S. W., GongG., Signal Designs With Good Correlation: For Wireless Communications Cryptography and Radar Applications, U.K., Cambridge:Cambridge University Press, 2005, https://doi.org/10.1017/CBO9780511546907.

72. Gong G. , Golomb S. W., Song H. Y. , «A note on low correlation zonesignal sets», IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 53, no. 7, pp. 2575-2581, Jul. 2007, https://doi.org/10.1109/TIT.2007.899538.

73. Harding, J. L. (2013). Data quality in the integration and analysis of data from multiple sources: some research challenges. The International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-2/W1, 59–63. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-2-w1-59-2013.

74. Haykin S. Communication Systems. 5th ed. – Hoboken: Wiley, 2009. – 912 p, ISBN: 978-0471697909.

75. Hu H. and Gong G., «New Sets of Zero or Low Correlation Zone Sequences via Interleaving Techniques,» in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 56, no. 4, pp. 1702-1713, April 2010, https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2040887.

76. Improvement of control method over the environment of cognitive radio system using a neural network / Y. Obikhod, V. Lysechko, Y. Sverhunova, O. Zhuchenko, O. Progonniy, G. Kachurovskiy, V. Tretijk, V. Malyuga, V. Voinov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2017. - № 4(9). - С. 22-28. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2017_4%289%29__3

77. Indyk S. V., Lysechko V. P., Kulagin D. O., Zhuchenko O. S., Kovtun I. V. (2022) The study of the cross-correlation properties of complex signals ensembles obtained by filtered frequency elements permutations. Radio Electronics, Computer Science, Control. National University «Zaporizhzhia Polytechnic». 2022. Issue 2 (61). P. 15 – 23, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-2.

78. Indyk S., Lysechko V. Method of permutation of intervals, taking into accountant correlation properties of segments. Control, navigation and communication system. 2020. Issue 3 (61).-P. 128-130. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.

79. Indyk S., Lysechko V. The formation method of complex signals ensembles with increased volume based on the use of frequency bands. Control, navigation and communication system. 2020. Issue 4 (62). P. 119-121. doi: 10.26906/SUNZ.2020.4.119.

80. Indyk S., Lysechko V. The study of ensemble properties of complex signals obtained by time interval permutation. Advanced Information Systems. 2020.-Vol. 4, № 3.-P. 85-88. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.11

81. Indyk S., Lysechko V., Zhuchenko O., Kitov V. The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with

low interaction in the time domain. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. Issue 4 (55).-P. 7-15. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1.

82. ITU-R Recommendation P.1407-6. Multipath propagation and parameterization of its characteristics. ITU, 2017, https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1407.

83. Jeon G., Chehri A. Entropy-Based Algorithms for Signal Processing. Entropy, 2020, https://doi.org/10.3390/e22060621.

84. Kim Y. S., Jang J. W. , No J. S., Chung H., "New design of low correlation zone sequence sets", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 52, no. 10, pp. 4607-4616, Oct. 2006, https://doi.org/10.1109/TIT.2006.881730.

85. Ko, Y.-C., Fujita, H. (2019). An evidential analytics for buried information in big data samples: Case study of semiconductor manufacturing. Information Sciences, 486, 190–203. https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.079.

86. Komar O., Kozlovska D., Chyrva D., Sorokun A. Evaluating the impact of cross-correlation properties of complex signals on the characteristics of smart radio systems. 2024 – Національний авіаційний університет. Наукоємні технології, «Електроніка, телекомунікації та радіотехніка» № 1(61), P. 21-28, 2024 DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18511.

87. Komar O., Lysechko V., Tarshin V., Mysyura O., Bezverkhy S. (2024) Complex signals parameters optimization on the base of linear approximations using the gradient method and Newton's method. Information and control systems in railway transport: scientific and technical journal. – Kharkiv: UkrDUZT, 2024. – No. 3(29). – P. 74–83. DOI: https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313786.

88. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International Journal of Man-Machine Studies, 24 (1), 65–75. https://doi.org/10.1016/s0020-7373(86)80040-2.

89. Koval, M., Sova, O., Shyshatskyi, A., Artabaiev, Y., Garashchuk, N., Yivzhenko, Y. et al. (2022). Improving the method for increasing the efficiency of decision-making based on bio-inspired algorithms. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (120)), 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268621.

90. Kuchuk, N., Mohammed, A. S., Shyshatskyi, A., Nalapko, O. (2019). The method of improving the efficiency of routes selection in networks of connection with the possibility of self-organization. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 8 (1). 1–6. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41636925.

91. Li J., Xu S., Zheng J., Jiang G., Ding W. (2024). Research on Multi-Objective Evolutionary Algorithms Based on Large-Scale Decision Variable Analysis. Applied Sciences, 14(22), 10309, https://doi.org/10.3390/app142210309. T. Liu, Y. Chen, X. Wang (2023). Domain Knowledge-Assisted Multi-Objective Evolutionary Algorithm for EEG-Channel Selection in Brain-Computer Interfaces. Frontiers in Neuroscience, 17, 1251968, https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1251968.

92. Litvinenko, O., Kashkevich, S., Shyshatskyi, A., Dmytriieva, O., Neronov, S., Plekhova, G. et al.; Shyshatskyi, A. (Ed.) (2024). Information and control systems: modelling and optimizations. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 180. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7.

93. Lysechko V. P., Komar O. M., Bershov V. S., Veklych O. K. Optimization of the parameters of synthesized signals using linear approximations by the Nelder-Mead method. 2024, National University «Zaporizhzhia Polytechnic». Radio Electronics, Computer Science, Control, 3 (70), P. 35-43 DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-3-4.

94. Ma X., Liu F., Qi Y., et al. (2025). A Decomposition-Based Evolutionary Algorithm with Neighborhood Region Domination (MOEA/D-NRD). Algorithms, 10(1), 19, https://doi.org/10.3390/biomimetics10010019.

95. Maccarone, A. D., Brzorad, J. N., Stonel, H. M. (2008). Characteristics and Energetics of Great Egret and Snowy Egret Foraging Flights. Waterbirds, 541. https://doi.org/10.1675/1524-4695-31.4.541.

96. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Tulenko, I., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., & Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in

organizational and technical systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(4 (134), 23–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102.

97. Mallat, S. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(7), 674–693. – https://doi.org/10.1109/34.192463.

98. Miao L., Sun Z., Jie Z. (2018) The Parallel Algorithm Based on Genetic Algorithm for Improving the Performance of Cognitive Radio. 2018. Wireless Communications and Mobile Computing. Vol. 2, https://doi.org/10.1155/2018/5986482 https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2018/5986482.

99. Morabito F.C. et al. (2012) Multivariate multi-scale permutation entropy for complexity analysis of Alzheimer's disease EEG, Entropy, vol. 14, no. 7, pp. 1186–1202, 2012. https://doi.org/10.3390/e14071186.

100. Nisar K.S. Numerical construction of generalized matrix partitioning code for spectral amplitude coding optical CDMA systems//Optik, Volume 130, February 2017, Pages 619-632, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.10.110.

101. Osman, A. M. S. (2019). A novel big data analytics framework for smart cities. Future Generation Computer Systems, 91, 620–633. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.06.046.

102. Panda S. Performance improvement of optical CDMA networks with stochastic artificial bee colony optimization technique// Optical Fiber Technology, Volume 42, May 2018, Pages 140-150, https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.03.005.

103. Panda, S.; Palai, G. Design and Performance analysis of data encrypted two dimensional coding technique for wavelength hopping time spreading Optical CDMA. Optik 2020, 207, 163864, https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163864.

104. Perets K., Komar O., (2025) Optimization method using Lagrange multipliers to ensure conditions of orthogonality and stability of signal reconstruction. – Національний авіаційний університет. Наукоємні технології, «Електроніка, телекомунікації та радіотехніка», Київ, 2025. Том. 65, № 1, С. 69-76, https://doi.org/10.18372/2310-5461.65.19927.

105. Perets K., Lysechko V., Komar O. (2024) Modeling Nonlinear Signal Components Based on Volterra Series in the Frequency Domain during Spectral Reconstruction. Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering. – Луцьк. – 2024. № 57, С.192-201. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-23.

106. Pérez-González, C. J., Colebrook, M., Roda-García, J. L., Rosa-Remedios, C. B. (2019). Developing a data analytics platform to support decision making in emergency and security management. Expert Systems with Applications, 120, 167–184. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.023.

107. Pievtsov, H., Turinskyi, O., Zhyvotovskyi, R., Sova, O., Zvieriev, O., Lanetskii, B., Shyshatskyi, A. (2020). Development of an advanced method of finding solutions for neuro-fuzzy expert systems of analysis of the radioelectronic situation. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 78–89. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001353.

108. Pohasii S., Yevseiev S., Zhuchenko O., Milov O., Lysechko V., Kovalenko O., Kostiak M., Volkov A., Lezik A., Susukailo V.. Development of crypto-code constructs based on LDPC codes. 2022. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (9 (116)), 44–59. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254545.

109. Przystupa K., Pyrih J., Beshley M., Klymash M., Branytskyy A., Beshley H., Pieniak D.and Gauda K. «Improving the Efficiency of Information Flow Routing in Wireless Self-Organizing Networks Based on Natural Computing», Energies, vol. 14, no. 8, Apr. 2021. – P. 2255-1 – 2255-24. https://doi.org/10.3390/en14082255.

110. Rajesh Pillai N., Kumar Y. (2006) On shift sequences for interleaved construction of sequence sets with low correlation. ArXiv preprint, 2006. – URL: https://arxiv.org/abs/cs/0610012.

111. Ramaji, I. J., Memari, A. M. (2018). Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. Automation in Construction, 90, 117–133. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025.

112. Richman JS, Moorman JR. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2000 Jun;278(6):H2039-49. doi: 10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039. PMID: 10843903.

113. Rostaghi M. and Azami H. (2016) Dispersion entropy: A measure for time-series analysis, IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 5, pp. 610-614, 2016, https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2542881.

114. Regulation (EU) 2015/2120 (Net neutrality), https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2015/2120/oj.

115. Saha Aditya A., Anand G.V. (2003) Design of detectors based on stochastic resonance// Signal Processing, Volume 83, Issue 6, June 2003, Pages 1193-1212, https://doi.org/10.1016/S0165-1684(03)00039-2.

116. Schretter C., Toschi L., Keller A. (2011) Golden ratio sequences for low-discrepancy sampling. Journal of Graphics Tools, 2011. – RWTH Aachen University. – URL: https://graphics.rwth-aachen.de/media/papers/jgt.pdf

117. Shan, B.; Fang, Y. A Cross Entropy Based Deep Neural Network Model for Road Extraction from Satellite Images. Entropy 2020, 22, 535, https://doi.org/10.3390/e22050535.

118. Shevchenko O.O., Lysechko V.P. (2025) Method of time permutations based on Markov models. – National Aviation University. Science-intensive Technologies. Series: «Electronics, telecommunications and radio engineering», Kyiv, 2025. Vol. 68, № 4, PP. 533-562, https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20740.

119. Shiang H., van der Schaar. Distributed resource management in multi-hop cognitive radio networks for delay sensitive transmission. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 58(2). IEEE Transactions on Vehicular Technology. P. 941–953. https://www.vanderschaar-lab.com/papers/Shiang&vdS-DistributedResource-TVT-2009.pdf.

120. Shyshatskyi, A. (2020). Complex Methods of Processing Different Data in Intellectual Systems for Decision Support System. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9 (4), 5583–5590. https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/206942020.

121. Shyshatskyi, A., Stasiuk, T., Odarushchenko, E., Berezanska, K., Demianenko, H. (2023). Method of assessing the state of hierarchical objects based on bio-inspired algorithms. Advanced Information Systems, 7 (3), 44–48. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.06.

122. Song H., Liu Y., Chen J., Wang J., Shen L. (2021). Evolutionary Ensemble Learning for Multivariate Time-Series. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 51(12), 7373–7385. https://arxiv.org/pdf/2108.09659.

123. Sorokin A. (2025) A unified implementation of quasi-Monte Carlo generators, randomization routines, and fast kernel methods. ArXiv preprint, 2025. – URL: https://arxiv.org/abs/2502.14256.

124. Sova, O., Shyshatskyi, A., Salnikova, O., Zhuk, O., Trotsko, O., Hrokholskyi, Y. (2021). Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 30–40. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001940.

125. Stoica, P., Moses, R. (2005). Spectral analysis of signals. Pearson Prentice Hall, 2005. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5313370.

126. Syvolovskyi I., Komar O. (2025). A method of multicriteria data stream distribution in telecommunication networks based on an evolutionary approach// Computer-integrated technologies: education, science, production/Lutsk National Technical University. – Lutsk. – 2025. (№59), P.P. 230-239. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-41.

127. Tarhuni N. et al. Power control of optical CDMA star networks// Optics Communications, Volume 259, Issue 2, 15 March 2006, Pages 655-664, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.09.068.

128. Torii H. , M. Nakamura and N. Suehiro, «A new class of zero-correlationzone sequences», IEEE. Trans. Inf. Theory, vol. 50, no. 3, pp. 559-565, Mar. 2004, https://doi.org/10.1109/TIT.2004.825399.

129. Trubchaninova K., Knyazev V., Kravchenko V., Lazurenko B., Serkov O., Panchenko N. Development of Methods and Models to Improve the Noise Immunity of Wireless Communication Channels // Східно-Європейський журнал

передових технологій. 2022. № 1 (5-115). С. 35 – 42. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253458.

130. Tulenko I., Shevchenko O. (2025) Entropy-based evaluation method of signal ensembles using LPT-τ permutations and Markov models// Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering / Lutsk National Technical University. – Lutsk. – 2025. (№61), P.P.300-310, https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-39.

131. Tulenko I. M., Komar O.M. (2025) Time-domain formation of signal ensembles using LPT-τ-sequences. – National Aviation University. Science-intensive Technologies. Series: «Electronics, telecommunications and radio engineering», Kyiv, 2025. Vol. 68, № 4, PP. 543-552, https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20739.

132. Tulenko I. M., Indyk S.V. Method for Multi-Objective Optimization of Complex Signal Ensembles Based on the Evolutionary Algorithm E-LPT-MOEA/D// SISIOT (Security of Infocommunication Systems and Internet of Things), Vol.3, No.2 (Dec.2025), P. 02014//Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych. https://doi.org/10.31861/sisiot2025.2.02014.

133. Veklych O. Drobyk O., Komar O., Lysechko V. Method of local optimization of complex signal ensembles based on the algorithms of gradient descent and Levenberg–Marquardt// Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering/ Lutsk National Technical University. – Lutsk. – 2025. (№61), P.P. 290-299 https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-34.

134. Wang H., Li D., Liu Z., Zhao J. (2021). Harmonic Detection Method Based on Permutation Entropy. Review of Scientific Instruments, 92(2), 025118, https://doi.org/10.1063/1.5141923.

135. Wang Z., Chen Z., Xia B., Luo H. Modeling and bandwidth allocation of cognitive relay networks. 2016. In Proceedings of the 2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). P. 14–16 https://ieeexplore.ieee.org/document/7636882.

136. Xiao Yu, Weimin Li, Bing Yang, et al. (2024). Periodic Distribution Entropy: Unveiling the complexity of physiological time series through multidimensional dynamics. Information Fusion, https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102391.

137. Xudong Liu et al. A novel devaney chaotic map with uniform trajectory for color image encryptio. Applied Mathematical Modelling, Volume 120, August 2023, Pages 153-174, https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.03.038.

138. Yeromina, N., Kurban, V., Mykus, S., Peredrii, O., Voloshchenko, O., Kosenko, V. et al. (2021). The Creation of the Database for Mobile Robots Navigation under the Conditions of Flexible Change of Flight Assignment. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 11 (5), 37–44. https://doi.org/10.46338/ijetae0521_05.

139. Zhang Q., Li H. (2007). MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 11(6), 712-731, https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759.

140. Zhou Z. , Z. Pan and X. H. Tang, «New families of optimal zero correlationzone sequences based on interleaved technique and perfect sequences», IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, no. 12, Nov. 2008, https://doi.org/10.1093/ietfec/e91-a.12.3691.

141. Zhuchenko O., Bershov V., Adaptive method of forming complex signals ensembles based on multi-level recurrent time-frequency segment modeling. 2024 – Національний авіаційний університет. Наукоємні технології, «Електроніка, телекомунікації та радіотехніка» № 3 (63), P. 257-264, 2024 DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.18953.

142. Zuiev, P., Zhyvotovskyi, R., Zvieriev, O., Hatsenko, S., Kuprii, V., Nakonechnyi, O. et al. (2020). Development of complex methodology of processing heterogeneous data in intelligent decision support systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (9 (106)), 14–23. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208554.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Bondar, A. V., Shumilin, H. O., Ahamova, R. H., Tulenko, I. M. (2023). Planning of experimental research in the formation of reinforcing protective coatings. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації, 19(26). https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-23, *(особистий внесок: Туленко І.М. – математична модель; Bondar A.V. – запропонований метод дослідження; Shumilin H.O. – експериментальні дослідження; Ahamova R.H. – програмна реалізація та підготовка публікації).*

2. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Tulenko, I.,Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., & Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in organizational and technical systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(4 (134), 23–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102. (Scopus). *(особистий внесок: Mahdi Q.A. – запропонований метод, координація роботи групи; Туленко І.М. – математична модель; Shyshatskyi A. – постановка задачі; Voznytsia A., Plekhova G. – програмна реалізація; Shostak S., Semko R., Zheliezniak D., Momit A., Sova M. – експериментальне моделювання).*

3. Tulenko I., Shevchenko O. (2025) Entropy-based evaluation method of signal ensembles using LPT-τ permutations and Markov models// Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering/Lutsk National Technical University. – Lutsk. – 2025. (№61), P.P.300-310, https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-39. (*особистий внесок: Туленко І.М. – метод на основі LPT-τ-перестановок; Шевченко О.О. – метод на основі марківської моделі).*

4. Tulenko I. M., Komar O.M. (2025) Time-domain formation of signal ensembles using LPT-τ-sequences. – National Aviation University. Science-intensive Technologies. Series: «Electronics, telecommunications and radio engineering», Kyiv, 2025. Vol. 68, № 4, PP. 543-552, https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20739, *(особистий внесок: Туленко І.М. – метод формування ансамблів сигналів на основі LPT-τ-послідовностей, Комар О.М. – аналіз результатів та підготовка публікації).*

5. Tulenko I. M., Indyk S.V. Method for Multi-Objective Optimization of Complex Signal Ensembles Based on the Evolutionary Algorithm E-LPT-MOEA/D// SISIOT (Security of Infocommunication Systems and Internet of Things), Vol.3, No.2 (Dec.2025), P. 02014//Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych. https://doi.org/10.31861/sisiot2025.2.02014, *(особистий внесок: Туленко І.М. – метод багатокритеріальної оптимізації E-LPT-MOEA/D та математична модель; Індик С.В. – наукове консультування, аналіз результатів).*

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Туленко І.М., Індик С.В., Свищов М.Ю. Удосконалення методу формування ансамблів складних сигналів у часовій області за рахунок LPT-τ – послідовностей// Тези доповіді за матеріалами 38 Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті». 9-10 жовтня 2025 року. – С. 85 *(форма участі – секційна доповідь); (особистий внесок: Туленко І.М. Удосконалений метод формування ансамблів сигналів; Індик С.В. – аналіз результатів; Свищов М.Ю. – програмна реалізація).*

7. Tulenko I., Shevchenko O. Method for integrated assessment of structural stability of complex signal ensembles using entropy-based analysis//Innovative Research in Science and Economy: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. Brussels, Belgium. April 1-3, 2026., SECTION: TECHNICAL SCIENCES, P.P. 368-371, *(форма участі – публікація тез доповіді); (особистий внесок: Туленко І.М. – метода та модель: Шевченко О.О. – програмна реалізація).*

8. Tulenko I., Indyk S. Method for entropy-weighted updating of weighting coefficients in a genetic algorithm for optimization of complex signal ensembles in cognitive telecommunication systems// Application of Information Technologies in Training and Operations of Security and Defense Forces: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (March 17, 2026, Kharkiv, Ukraine). – Kharkiv: Nat. Acad. of the Nat. Guard of Ukraine, 2026, p.371-372, *(форма участі – публікація тез доповіді): (особистий внесок: Туленко І.М. – ентропійно-зваженого коригування коефіцієнтів генетичного алгоритму; Індик С.В. – наукове консультування).*

9. Tulenko I., Indyk S. Entropy-based evaluation method of signal ensembles using permutations //XXII міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: тези доповідей, 08 – 09 квітня 2026 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2026, с. 420, *(форма участі: секційна доповідь); (особистий внесок: метод ентропійного оцінювання ансамблів сигналів; Індик С. – аналіз результатів та підготовка публікації).*

10. Туленко І.М, Індик С.В. Формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем в умовах завадового середовища // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів 14-15 травня 2026). Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Issue 31 P.568, *(форма участі – публікація тез доповіді): (особистий внесок: метод формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем; Індик С.В. – аналіз результатів та наукове консультування).*

ДОДАТОК Б

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»:
Проректор з наукової роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту
кандидат технічних наук, доцент

_____ Артур КАГРАМАНЯН
«20» квітня 2026 року

АКТ
впровадження у навчальний процес
Українського державного університету залізничного транспорту
результатів дисертаційного дослідження **Туленка Ігоря Михайловича**

Комісія у складі:

голова – професор кафедри транспортного зв'язку, д.т.н., проф. Штомпель М.А.

члени – доцент кафедри транспортного зв'язку, к.т.н., доц. Жученко О.С.
– доцент кафедри транспортного зв'язку, к.т.н., доц. Єлізаренко А.О.
– доцент кафедри транспортного зв'язку, к.т.н., доц. Корольова Н.А.

склала цей акт про те, що у навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при викладанні навчальних дисциплін за освітніми програмами першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти «Телекомунікації та радіотехніка» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка: «Телекомунікаційні системи передачі», «Системи керування в телекомунікаціях», а також при виконанні бакалаврських кваліфікаційних робіт було використано наступні результати дисертаційної роботи Туленка І.М.:

– удосконалений метод формування ансамблів складних сигналів за рахунок застосування ЛПτ-послідовностей для формування індексної перестановки часових інтервалів, що, на відміну від існуючих підходів, забезпечує керовану варіативність ансамблю, рівномірне покриття простору перестановок та зниження взаємної кореляції сигналів при підвищенні масштабованості ансамблю в межах заданих кореляційних обмежень;

–удосконалений ентропійно-орієнтований метод оцінки структурної

впорядкованості ансамблів складних сигналів шляхом введення єдиного інтегрального критерію, який поєднує ентропійні показники і, на відміну від існуючих підходів, забезпечує кількісну оцінку структурної стійкості ансамблів та дозволяє виявляти оптимальні параметри їх часової організації в умовах завад;

– розвинутий метод багатокритеріальної оптимізації ансамблів складних сигналів у часовій області на основі модифікованого алгоритму MOEA/D, який, на відміну від відомих підходів, враховує ЛПτ-перестановки часових сегментів та ентропійні характеристики структури сигналів, що забезпечує узгодження процесу еволюційної оптимізації та підвищення структурної стійкості ансамблів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Туленка І.М. дозволило збільшити науковий та методичний рівень вказаних навчальних дисциплін та сприяло удосконаленню навчального процесу.

Голова комісії:
д.т.н., професор, професор кафедри
транспортного зв'язку _____ Микола ШТОМПЕЛЬ

Члени комісії:
к.т.н., доцент, доцент кафедри
транспортного зв'язку _____ Олександр ЖУЧЕНКО
к.т.н., доцент, доцент кафедри
транспортного зв'язку _____ Андрій ЄЛІЗАРЕНКО
к.т.н., доцент, доцент кафедри
транспортного зв'язку _____ Наталія КОРОЛЬОВА

ДОДАТОК В

ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЗОВАНИХ ЛПТ-ПЕРЕСТАНОВОК ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ З КОРЕЛЯЦІЙНОЮ ОПТИМІЗАЦІЄЮ

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# ---------- LPT-TP core (2.10)–(2.13) ----------
def lpt_pi(P: int, tau: float, alpha: float = (np.sqrt(5) - 1) / 2) ->
np.ndarray:
    i = np.arange(P, dtype=float)
    u = (i * alpha + tau) % 1.0                    # u_i = frac(i*alpha +
tau)  (2.10)
    pi = np.argsort(u, kind="mergesort")           # π =
arcsort(u)             (2.11)
    return pi

def segment_signal(s: np.ndarray, P: int) -> np.ndarray:
    L = s.size
    if L % P != 0:
        raise ValueError("L % P must be 0")
    Nseg = L // P
    return s.reshape(P, Nseg)                      # s(t)={I0,...,I_{P-
1}}      (2.9)

def permute_signal(s: np.ndarray, P: int, tau: float) -> np.ndarray:
    seg = segment_signal(s, P)
    pi = lpt_pi(P, tau)
    return seg[pi].reshape(-1)                     # Concat{I_{π(0)},...,I_{π(P-
1)}} (2.13)


# ---------- Autocorrelation + PSL/ISL (2.3)–(2.5) ----------
def autocorr(s: np.ndarray) -> np.ndarray:
    P = s.size
    R = np.empty(P, dtype=np.complex128)
    for k in range(P):
        R[k] = np.vdot(s[:P - k], s[k:P])          # R^(τ)(k) (2.3)
    return R

def psl_isl(R: np.ndarray) -> tuple[float, float]:
    sidelobes = np.abs(R[1:])
    PSL = float(np.max(sidelobes))                 # PSL(τ) (2.4)
    ISL = float(np.sum(sidelobes**2))              # ISL(τ) (2.5)
    return PSL, ISL
```

```python
# ---------- Energy variance Var[E^(τ)(t)] (2.7) ----------
def var_energy(s_tau: np.ndarray, P: int) -> float:
    seg = segment_signal(s_tau, P)
    E = np.sum(np.abs(seg)**2, axis=1)
    return float(np.var(E, ddof=1))                # Var[E^(τ)(t)]


# ---------- BW_eff^(τ) (2.7) ----------
def bw_eff(s_tau: np.ndarray) -> float:
    X = np.fft.fft(s_tau)
    S = np.abs(X)**2
    S_sum = np.sum(S) + 1e-18
    S_norm = S / S_sum
    return float(1.0 / (np.sum(S_norm**2) + 1e-18))  # BW_eff^(τ)


# ---------- Integral criterion K(τ) + τ* (2.7)-(2.8) ----------
def K_tau(PSL: float, ISL: float, VarE: float, BW: float,
          w1: float, w2: float, w3: float, w4: float) -> float:
    return float(w1*PSL + w2*ISL + w3*VarE + w4*BW)  # K(τ) (2.7)

def find_tau_star(s: np.ndarray, P: int, tau_grid: np.ndarray,
                  PSL_th: float, ISL_th: float,
                  w1: float, w2: float, w3: float, w4: float):
    best_tau, best_K = None, np.inf
    kept = []
    for tau in tau_grid:
        s_tau = permute_signal(s, P, float(tau))     # (2.2)/(2.13)
        R = autocorr(s_tau)                          # (2.3)
        PSL, ISL = psl_isl(R)                        # (2.4)-(2.5)

        if (PSL <= PSL_th) and (ISL <= ISL_th):      # (2.6)
            VarE = var_energy(s_tau, P)
            BW = bw_eff(s_tau)
            K = K_tau(PSL, ISL, VarE, BW, w1, w2, w3, w4)
            kept.append((float(tau), PSL, ISL, VarE, BW, K))
            if K < best_K:
                best_K = K
                best_tau = float(tau)
    return best_tau, np.array(kept, dtype=float)      # τ* = arg min K(τ) (2.8)


# ---------- AWGN + threshold decision (3.4) ----------
def add_awgn(s: np.ndarray, snr_db: float, rng: np.random.Generator) ->
np.ndarray:
    P_sig = np.mean(np.abs(s)**2)
    snr_lin = 10**(snr_db/10)
    P_n = P_sig / snr_lin
    n = (rng.normal(0, np.sqrt(P_n/2), size=s.size) +
         1j*rng.normal(0, np.sqrt(P_n/2), size=s.size))
    return s + n
```

```
def decision_error_rate(s: np.ndarray, snr_db: float, N: int, gamma: float,
                        rng: np.random.Generator) -> float:
    err = 0
    for _ in range(N):
        y = add_awgn(s, snr_db, rng)
        R = autocorr(y)
        stat = np.max(np.abs(R[1:]))                # max|R(k)|, k≠0
        if stat < gamma:                            # H1 true, H0 decided =>
error
            err += 1
    return err / N


# ---------- 95% CI (Student t) (3.4) ----------
def ci95(samples: np.ndarray) -> tuple[float, float]:
    xbar = float(np.mean(samples))
    s = float(np.std(samples, ddof=1))
    N = samples.size
    # t_{0.975, v} береться з таблиці/бібліотеки у повній реалізації;
    # у фрагменті лишається як параметр t975.
    return xbar, s/np.sqrt(N)


# ---------- Plots for Fig. 3.4 and Fig. 3.5 ----------
def plot_pe_vs_snr(s_dict: dict, P_label: int, snr_list: list, out_path: str):
    plt.figure()
    for name, pe in s_dict.items():
        plt.plot(snr_list, pe, marker='o', label=name)
    plt.xlabel("SNR")
    plt.ylabel("P_e")
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.savefig(out_path, dpi=300, bbox_inches="tight")
    plt.close()

def plot_pe_vs_P(pe_by_P: dict, snr_label: float, out_path: str):
    P_list = sorted(pe_by_P.keys())
    plt.figure()
    for name in next(iter(pe_by_P.values())).keys():
        y = [pe_by_P[P][name] for P in P_list]
        plt.plot(P_list, y, marker='o', label=name)
    plt.xlabel("P")
    plt.ylabel("P_e")
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.savefig(out_path, dpi=300, bbox_inches="tight")
    plt.close()
```

ДОДАТОК Г

ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ ЕНТРОПІЙНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ ВПОРЯДКОВАНОСТІ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import PchipInterpolator

# snr = np.array([-10, -5, 0, 5, 10], dtype=float)

# P = 257: P_e ± CI
pe_257 = {
    "SFrank":         (np.array([0.348, 0.224, 0.118, 0.053, 0.022]),
np.array([0.026, 0.020, 0.015, 0.009, 0.005])),
    "Sh-energy":      (np.array([0.295, 0.178, 0.084, 0.036, 0.013]),
np.array([0.022, 0.017, 0.012, 0.007, 0.004])),
    "ЛПт (неопт.)":   (np.array([0.256, 0.145, 0.066, 0.025, 0.008]),
np.array([0.019, 0.014, 0.010, 0.006, 0.003])),
    "ЛПт (τ*)":       (np.array([0.213, 0.117, 0.049, 0.017, 0.004]),
np.array([0.017, 0.012, 0.008, 0.004, 0.002])),
}

# SNR = -5: P_e ± CI vs P
P = np.array([40, 100, 257, 513], dtype=float)
pe_snr_m5 = {
    "SFrank":         (np.array([0.327, 0.279, 0.224, 0.171]), np.array([0.028,
0.025, 0.020, 0.016])),
    "Sh-energy":      (np.array([0.276, 0.229, 0.178, 0.132]), np.array([0.025,
0.021, 0.017, 0.013])),
    "ЛПт (неопт.)":   (np.array([0.241, 0.194, 0.145, 0.104]), np.array([0.022,
0.019, 0.014, 0.011])),
    "ЛПт (τ*)":       (np.array([0.208, 0.162, 0.117, 0.082]), np.array([0.020,
0.017, 0.012, 0.009])),
}

# Ентропії від τ (Табл. 3.2)
tau = np.array([0.2, 0.38, 0.5, 0.618, 0.8, 0.9], dtype=float)
ent = {
    "Перестановочна ентропія": np.array([0.569, 0.596, 0.739, 0.687, 0.790,
0.797]),
    "Нечітка ентропія":        np.array([0.576, 0.608, 0.726, 0.680, 0.771,
0.778]),
    "Ентропія розсіювання":    np.array([0.509, 0.506, 0.664, 0.589, 0.711,
0.717]),
    "Ентропія вибірки":        np.array([0.489, 0.544, 0.644, 0.619, 0.691,
0.697]),
```

```
}
# -------------------- 2) Функція PCHIP --------------------
def pchip_xy(x, y, n=300):
    f = PchipInterpolator(x, y)  # shape-preserving -> не створює фейкових
мінімумів між точками
    xx = np.linspace(x.min(), x.max(), n)
    yy = f(xx)
    return xx, yy

# -------------------- 3) Рис. 3.2/3.3: Ентропії від τ (PCHIP + точки) ---------
-----------
plt.figure()
for name, y in ent.items():
    xx, yy = pchip_xy(tau, y)
    plt.plot(xx, yy, label=name)
    plt.plot(tau, y, marker="o", linewidth=0)  # табличні точки
plt.xlabel("Параметр зсуву τ")
plt.ylabel("Значення ентропійного показника")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

# -------------------- 4) Рис. P_e(SNR) для P=257 (з CI) --------------------
plt.figure()
for name, (y, ci) in pe_257.items():
    plt.errorbar(snr, y, yerr=ci, marker="o", capsize=3, label=name)
plt.xlabel("SNR")
plt.ylabel("Ймовірність помилки виявлення сигналу, $P_e$")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

# -------------------- 5) Рис.: P_e(P) для SNR=-5 dB (з CI) --------------------
plt.figure()
for name, (y, ci) in pe_snr_m5.items():
    plt.errorbar(P, y, yerr=ci, marker="o", capsize=3, label=name)
plt.xlabel("Довжина послідовності P")
plt.ylabel("Ймовірність помилки виявлення сигналу, $P_e$")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

ДОДАТОК Д

ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО АЛГОРИТМУ MOEA/D

```python
import numpy as np
import random
from typing import List, Tuple

# ----------------------------
# ПАРАМЕТРИ АЛГОРИТМУ
# ----------------------------
N = 40                  # розмір популяції
T_MAX = 100             # кількість поколінь
P_C = 0.8               # імовірність схрещування
P_M = 0.15              # початкова імовірність мутації
TAU_SEG = 8             # кількість часових сегментів
L = 10                  # кількість підзадач MOEA/D
K_THRESHOLD = 0.65      # поріг ентропійного критерію
GAMMA = 0.05            # коефіцієнт адаптації мутації

# ----------------------------
# ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ
# ----------------------------
def generate_random_permutation(n_segments: int) -> List[int]:
    perm = list(range(n_segments))
    random.shuffle(perm)
    return perm

def generate_lpt_permutation(n_segments: int, tau: float) -> List[int]:
    """Формування LPT-τ-перестановки."""
    values = [((i + 1) * tau) % 1.0 for i in range(n_segments)]
    return [idx for idx, _ in sorted(enumerate(values), key=lambda x: x[1])]

def initialize_population(n_pop: int, n_segments: int, tau: float) ->
List[List[int]]:
    pop = []
    half = n_pop // 2
    for _ in range(half):
        pop.append(generate_random_permutation(n_segments))
    for _ in range(n_pop - half):
        pop.append(generate_lpt_permutation(n_segments, tau))
    return pop

def signal_from_permutation(base_signal: np.ndarray, perm: List[int]) ->
np.ndarray:
    segments = np.array_split(base_signal, len(perm))
```

```
    reordered = [segments[i] for i in perm]
    return np.concatenate(reordered)
# ----------------------------
# КРИТЕРІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ
# ----------------------------
def rho_mean(signal_ensemble: List[np.ndarray]) -> float:
    vals = []
    for i in range(len(signal_ensemble)):
        for j in range(i + 1, len(signal_ensemble)):
            c = np.corrcoef(signal_ensemble[i], signal_ensemble[j])[0, 1]
            vals.append(abs(c))
    return float(np.mean(vals)) if vals else 0.0

def isl(signal: np.ndarray) -> float:
    acf = np.correlate(signal, signal, mode="full")
    center = len(acf) // 2
    sidelobes = np.delete(acf, center)
    return float(np.sum(np.abs(sidelobes)))

def energy_variance(signal_ensemble: List[np.ndarray]) -> float:
    energies = [np.sum(s ** 2) for s in signal_ensemble]
    return float(np.var(energies))

def entropy_structure(signal: np.ndarray) -> float:
    hist, _ = np.histogram(signal, bins=16, density=True)
    hist = hist[hist > 0]
    return float(-np.sum(hist * np.log(hist)))

def fitness_vector(base_signal: np.ndarray, perm: List[int]) -> Tuple[float,
float, float, float]:
    s = signal_from_permutation(base_signal, perm)
    ensemble = [s]
    return (
        0.0,                    # для однієї реалізації rho_mean тут умовно 0
        isl(s),
        energy_variance(ensemble),
        entropy_structure(s)
    )

# ----------------------------
# MOEA/D: ЛОКАЛЬНІ ПІДЗАДАЧІ
# ----------------------------
def generate_weight_vectors(l: int, n_obj: int = 4) -> np.ndarray:
    weights = np.random.rand(l, n_obj)
    weights /= np.sum(weights, axis=1, keepdims=True)
    return weights

def scalar_objective(f: Tuple[float, float, float, float], w: np.ndarray) ->
float:
    return float(np.sum(np.array(f) * w))
```

```
# ----------------------------
# ПАРЕТО-ДОМІНУВАННЯ
# ----------------------------
def dominates(f1: Tuple[float, ...], f2: Tuple[float, ...]) -> bool:
    return all(a <= b for a, b in zip(f1, f2)) and any(a < b for a, b in zip(f1,
f2))

def update_archive(archive: List[Tuple[List[int], Tuple[float, ...]]],
                   candidate: Tuple[List[int], Tuple[float, ...]]) ->
List[Tuple[List[int], Tuple[float, ...]]]:
    new_archive = []
    cand_perm, cand_fit = candidate
    dominated = False

    for perm, fit in archive:
        if dominates(fit, cand_fit):
            dominated = True
            new_archive.append((perm, fit))
        elif not dominates(cand_fit, fit):
            new_archive.append((perm, fit))

    if not dominated:
        new_archive.append((cand_perm, cand_fit))
    return new_archive
# ----------------------------
# ГЕНЕТИЧНІ ОПЕРАТОРИ
# ----------------------------
def crossover(p1: List[int], p2: List[int]) -> Tuple[List[int], List[int]]:
    a, b = sorted(random.sample(range(len(p1)), 2))
    child1 = [-1] * len(p1)
    child2 = [-1] * len(p2)

    child1[a:b] = p1[a:b]
    child2[a:b] = p2[a:b]
    fill1 = [x for x in p2 if x not in child1]
    fill2 = [x for x in p1 if x not in child2]
    idx1 = idx2 = 0
    for i in range(len(p1)):
        if child1[i] == -1:
            child1[i] = fill1[idx1]
            idx1 += 1
        if child2[i] == -1:
            child2[i] = fill2[idx2]
            idx2 += 1

    return child1, child2

def mutate(perm: List[int], p_m: float) -> List[int]:
    perm = perm.copy()
    if random.random() < p_m:
```

```
        i, j = random.sample(range(len(perm)), 2)
        perm[i], perm[j] = perm[j], perm[i]
    return perm

def adaptive_mutation_rate(base_rate: float, k_value: float, gamma: float) ->
float:
    return min(0.9, base_rate + gamma * k_value)
# ----------------------------
# ОСНОВНИЙ ЦИКЛ АЛГОРИТМУ
# ----------------------------
def run_e_lpt_moead(base_signal: np.ndarray, tau: float = 0.3):
    population = initialize_population(N, TAU_SEG, tau)
    weights = generate_weight_vectors(L)
    archive = []
    mutation_rate = P_M

    for t in range(T_MAX):
        evaluated = []
        for perm in population:
            fit = fitness_vector(base_signal, perm)
            evaluated.append((perm, fit))
            archive = update_archive(archive, (perm, fit))

        # Адаптивне налаштування мутації за ентропійним критерієм
        mean_k = np.mean([fit[3] for _, fit in evaluated])
        mutation_rate = adaptive_mutation_rate(P_M, mean_k, GAMMA)

        # Формування нової популяції
        new_population = []
        while len(new_population) < N:
            p1, p2 = random.sample(population, 2)

            if random.random() < P_C:
                c1, c2 = crossover(p1, p2)
            else:
                c1, c2 = p1[:], p2[:]

            c1 = mutate(c1, mutation_rate)
            c2 = mutate(c2, mutation_rate)

            new_population.extend([c1, c2])
        population = new_population[:N]
    return archive
```