

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.8>

ОБГРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ

Зубенко В. О. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-8401-755X

Березюк І. А. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнського національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0003-1903-8204

Телюта Р. В. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнського національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0002-4923-1227

Передача інформації має велику цінність у багатьох сферах життя, технології, науки та комунікації. А безпомилкова передача інформації забезпечує надійність та точність отриманої інформації. Це особливо важливо в критичних ситуаціях, наприклад, в медицині, авіації, фінансових транзакціях, де навіть невеликі помилки можуть мати серйозні наслідки. Крім того безпомилкова передача інформації дозволяє економити ресурси, такі як пропускна здатність мережі, енергія та час, що особливо актуально у сферах зв'язку, де обмежені ресурси повинні бути ефективно використані для передачі великих обсягів даних. В сучасному швидкому темпі життя, швидкість та ефективність комунікації мають вирішальне значення, оскільки безпомилкова передача інформації дозволяє ефективно використовувати її без необхідності витрачати час і зусилля на виправлення помилок або повторну передачу.

В даній статті проводиться аналіз та порівняльні дослідження відомих методів помилково-коригуючого кодування інформації, аргументуються критерії та показники їх ефективності. Вивчаються методи побудови каскадних кодових конструкцій, обґрунтовуються перспективні шляхи їх подальшого вдосконалення.

Аналіз і порівняльні дослідження відомих методів завадостійкого кодування виявили науково-технічне протиріччя між поточним станом науково-методичного апарату теорії завадостійкого кодування, можливостями застосовуваних систем корекції помилок кодів, існуючими методами та алгоритмами п завадостійкого кодування (декодування) і вимогами до властивостей, необхідних для практичних застосувань забезпечення заданого рівня помилковозахищеності передачі дискретних повідомлень в телекомунікаційних системах і мережах спеціального призначення, включаючи системи управління та зв'язку.

Проведені дослідження показали, що розробка перспективних каскадних кодових конструкцій з удосконаленими властивостями, отриманих шляхом каскадування лінійних блокових кодів з швидкими алгоритмами м'якого декодування та ітеративним обміном отриманими рішеннями, може розв'язати виявлену проблему. З одного боку, цей підхід дозволяє зберегти ідеологію турбо-кодування, тобто реалізувати обмін м'якими рішеннями в ітеративному багатокроковому процесі декодування, що забезпечує високу енерго-ефективність завадостійкого коду. З іншого боку, такий підхід дозволить значно знизити складність реалізації алгоритмів декодування, що разом із високою енергоефективністю дозволить використовувати цей клас каскадних кодів у телекомунікаційних системах і мережах спеціального призначення, включаючи системи управління та зв'язку.

Ключові слова: методи завадостійкого кодування, турбокод, м'яке кодування, каскадно-кодова конструкція.

Zubenko V. O., Bereziuk I. A., Teliuta R. V. Substantiation of ways to improve the methods of noise-resistant coding

Information transmission is of great value in many areas of life, technology, science and communications. And error-free transmission of information ensures the reliability and accuracy of received information. This is of crucial importance in critical situations, such as in medicine, aviation, and financial transactions, where even small errors can have serious consequences. In addition, error-free information transmission saves resources, such as network bandwidth, energy, and time, which is especially important in communications, where limited resources must be used efficiently to transmit large amounts of data. In today's fast pace lifestyle, the speed and efficiency of communication is crucial, as error-free transmission of information allows efficient use of information without the need to spend time and effort on error correction or retransmission.

The known methods of error-correcting information coding are analyzed in the article, and the criteria and indicators of their effectiveness are argued. The methods of constructing cascade code structures are studied, and promising ways of their further improvement are substantiated.

The analysis and comparative studies of known noise-resistant coding methods have revealed a scientific and technical contradiction between the current state of the scientific and methodological apparatus of noise-resistant coding theory, the capabilities of the applied error correction systems, the existing methods and algorithms of noise-resistant coding (decoding) and the requirements for the properties necessary for practical applications of ensuring a given error protection level of the transmission of discrete messages in telecommunication systems and special-purpose networks, including control and communication systems.

The recent study has shown that the development of promising cascade code constructions with improved properties obtained by cascading linear block codes with fast soft decoding algorithms and iterative exchange of the obtained solutions can solve the identified problem. On the one hand, this approach allows us to preserve the ideology of turbo coding, thus, to implement the exchange of soft solutions in an iterative multi-step decoding process, which ensures high energy efficiency of the noise-resistant code. On the other hand, this approach will significantly reduce the complexity of implementing decoding algorithms, which, together with high energy efficiency, will allow the use of this class of cascade codes in telecommunication systems and special-purpose networks, including control and communication systems.

Key words: methods of noise-resistant coding, turbo code, soft coding, cascade code construction.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших задач, які визначені Концепцією розвитку та зв'язку України, є розробка новітніх методів та технічних засобів цифрової обробки повідомлень, які передаються; технологій завадостійкої високошвидкісної передачі інформації для забезпечення надійності та ефективності комунікаційних систем.

Для розвитку завадостійких технологій, останнім часом найбільшого поширення отримали наступні напрямки досліджень:

- розробка ефективних алгоритмів кодування та декодування, з метою вдосконалення існуючих методів кодування та декодування, та розробку нових алгоритмів, які можуть забезпечувати високу завадостійкість та ефективність передачі інформації.

- використання новітніх кодових схем, тобто пріоритет надається не традиційним кодовим схемам, таким як коди Ріда-Соломона і коди Хемінга, а більш складним та ефективним кодовим схемам, наприклад, турбокодам, кодам Фонтана і LDPC (низькопарітетний домен кодування).

- розробка адаптивних та гнучких систем передачі, які забезпечують завадостійкість та потребують використання адаптивних методів, які враховують змінні умови передачі, такі як шум, перешкоди та інші фактори, що впливають на якість сигналу.

- використання технологій обробки сигналів, які є продовженням досліджень та розробки методів обробки сигналів та допоможуть виявляти та коригувати помилки, які виникають під час передачі, зберігання або обробки даних.

– використання каналів зв'язку з високою завадостійкістю означає розробку технологій, які використовують спеціальні типи каналів зв'язку, що мають властивості для ефективного протистояння шумам, перешкодам та іншим факторам, що можуть впливати на якість сигналу.

Ці напрями розвитку технологій завадостійкої передачі інформації включають як теоретичні дослідження, так і практичну реалізацію в сучасних комунікаційних системах та мають свої переваги та недоліки. Одним із перспективних напрямків дослідження в цьому напрямку є методи синтезу завадостійких кодів з покращеними властивостями, розробка обчислювальних ефективних алгоритмів їх побудови та декодування.

Проведемо дослідження та порівняльний аналіз відомих методів завадостійкого кодування інформації, обґрунтуємо критерії і показники їх ефективності; а також шляхи їх подальшого вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виправлення помилок та забезпечення завадостійкості є важливими властивостями кодів, особливо в сучасних системах зберігання та передачі даних.

Питанням кодування та корекції помилок, при передачі інформації займалась значна кількість вчених: Proakis D.G. (2000) [8], Lin, S., & Costello D. J. (2004). Error control coding: fundamentals and applications, де розглядаються основи кодування та корекції помилок, включаючи різні методи та кодові схеми, а також розглядаються практичні аспекти використання кодів в різних системах зв'язку. Moon, T. K. (2005). Error correction coding: mathematical methods and algorithms, пропонує математичний підхід до кодування та корекції помилок, а також аналізує різні алгоритми декодування та їх математичні основи. Wicker, S. B., & Bhargava, V. K. (1995). Reed-Solomon codes and their applications, спеціалізується на кодах Ріда-Соломона, які є одними з найбільш використовуваних типів завадостійких кодів, та досліджує методи побудови, кодування та декодування цих кодів.

Розробка та дослідження каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями та методів їх декодування з ітеративним обміном м'яких рішень є перспективним напрямом у розвитку теорії помилково-коригуючого кодування. Тому актуальність роботи, присвяченої розробці методів побудови та декодування каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями для підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень, є неоспоримою.

Мета статті – підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень

Виклад основного матеріалу. Одним із основних та найбільш ефективних засобів забезпечення високої завадостійкості передачі дискретних повідомлень є методи надлишкового (завадостійкого) кодування, основи теорії побудови та питання прикладного використання, які найбільш повно викладені в роботах [4; 5; 8; 9].

Проаналізуємо відомі методи завадостійкого кодування, вивчимо перспективні напрями їх подальшого вдосконалення, обґрунтуємо критерії та показники ефективності.

Під ефективністю розуміють відповідність результату виконуваної операції необхідному результату (еталону) [3; 2]. Під операцією, що виконується в даному контексті, будемо розуміти операцію завадостійкої високошвидкісної безпечної телепередачі дискретних повідомлень від відправника до одержувача [3]. Як основний технічний засіб (технічна система) виконання операції виступає система передачі даних (СПД), в якій за допомогою відповідних комплексних заходів забезпечуються необхідні показники завадостійкості, своєчасності та безпеки дискретних повідомлень, що передаються.

Функції завадостійкого кодування (декодування) в СПД покладаються на пристрої захисту від помилок (ПЗВ). Ефективність ПЗВ як ефективність операції завадостійкої телепередачі дискретних повідомлень оцінюється як відповідність отриманої завадостійкості необхідної (заздалегідь заданої).

За визначенням [3; 7] під стійкістю перешкод даних передачі розуміється мінімально необхідне співвідношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму E/N_0 , необхідне для забезпечення заданого рівня достовірності передачі дискретних повідомлень. Відповідно, основним показником достовірності є можливість правильного прийому символів повідомлень $R_{п.п.}$ або зворотна величина – ймовірність помилкового прийому символів повідомлення $R_{помил} = 1 - R_{п.п.}$ як показник втрати достовірності. При передачі повідомлень каналами зв'язку показники достовірності можна виразити як функцію від співвідношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму [3; 6; 7; 8]:

$$R_{п.п.}(E/N_0), R_{помил}(E/N_0) = 1 - R_{п.п.}(E/N_0).$$

Енергетичний вигравш від завадостійкого кодування (ЕВК) оцінюється у величині, яка досягається зниженням мінімально необхідного співвідношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності E/N_0 , необхідного для забезпечення заданих величин $R_{помил}$ і $R_{п.п.}$, тобто. [3; 6; 7]:

$$EBK = E / N_0(\text{без кодування}) - E / N_0(\text{з кодуванням}) \Big|_{R_{помил}=\text{const}, R_{п.п.}=\text{const}} \dots$$

Таким чином, основним показником ефективності завадостійкого кодування (реалізованого в ПЗВ) є ЕВК, що найчастіше вимірюється в логарифмічній шкалі, в дБ [3; 7; 8].

Слід зазначити, що застосування завадостійких кодів веде до двох негативних наслідків:

- 1) внесення в дані надлишкової інформації (надмірність), що передається, в результаті чого знижується відносна швидкість передачі інформації;
- 2) підвищенню обчислювальної складності обробки дискретних повідомлень, що передаються за рахунок виконання додаткових процедур завадостійкого кодування (декодування).

Очевидно, що ефективною системою кодування може вважатися лише та, яка при мінімальних обсягах надмірності і низької обчислювальної складності реалізації дозволяє забезпечити більший ЕВК. Таким чином, як показники ефективності завадостійкого кодування будемо використовувати:

- 1) енергетичний вигравш від кодування (ЕВК);
- 2) відносну швидкість передачі (R);
- 3) обчислювальну складність реалізації процедур кодування та декодування (SR).

До перерахованих показників слід віднести також можливість виправлення складних змін виникаючих помилок, зокрема. довгих пакетів помилок.

Як критерії ефективності системи завадостійкого кодування будемо використовувати:

- максимізацію енергетичного вигравшу від кодування ($\max(EBK)$);
- максимізацію відносної швидкості передачі даних ($\max(R)$);
- мінімізацію обчислювальної складності реалізації процедур кодування та декодування ($\min(SR)$).

Узагальнюючи вище викладене, оцінку та порівняння завадостійкості передачі дискретних повідомлень при використанні методів та засобів завадостійкого кодування, якщо не зазначено окремо, будемо проводити при фіксованій відносній швидкості $R = \text{const}$.

Проаналізуємо відомі методи завадостійкого кодування, дослідимо їх за розглянутими показниками та критеріями ефективності.

Основною перевагою безперервних і, перш за все, згорткових кодів є висока енергетична ефективність (високий енергетичний виграш від кодування (ЕВК)), що визначає високу стійкість до перешкод дискретних повідомлень.

У таблиці 1 наведено порівняльні оцінки деяких методів згорткового кодування (СК) за такими показниками:

- 1) енергетична ефективність – величина енергетичного виграшу від кодування проти некодированной передачею інформації, дБ;
- 2) можливість виправлення складних змін помилок, зокрема. довгих пакетів помилок;
- 3) обчислювальна складність реалізації алгоритмів кодування та декодування.

Дані таблиці 1 сформовані на основі аналізу науково-технічної літератури їх вітчизняних та зарубіжних джерел [4; 7; 8].

Таблиця 1

Порівняльні оцінки деяких безперервних методів завадостійкого кодування за різними показниками

Метод завадостійкого кодування	Енергетична ефективність (ЕВК)	Можливість виправлення складних конфігурацій помилок	Складність реалізації алгоритмів кодування та декодування (SR)
СК з декодуванням по Віттербі	4,5–6,5	Так	Висока
СК з м'яким декодуванням по Віттербі	5,5–7,5	Так	Дуже висока
СК із послідовним декодуванням	3,5–5,5	Так	Середня
СК із пороговим декодуванням	3,5–4,5	Так	Дуже низька

Аналіз наведених у таблиці 1 даних показує, що застосування завадостійких кодів дає різний енергетичний виграш за різної обчислювальної складності реалізації. Найбільший енергетичний виграш дають методи згортання з декодуванням по максимуму правдоподібності. Так, наприклад, методи згорткового кодування дають енергетичний виграш 4,5–6,5 дБ, а за використання алгоритмів декодування з м'якими рішеннями цей ефект можна посилити ще на 0,5–1,5 дБ.

Таким чином, як показав проведений аналіз, методи побудови та декодування згорткових кодів є важливим розділом сучасної теорії завадостійкого кодування. В той же час, існуючий стан обчислювальних алгоритмів декодування безперервних кодів стримує їх подальший розвиток: методи декодування по максимуму правдоподібності приваблює високими показниками ЕВК, але за обчислювальною складністю можна порівняти з перебірними процедурами і для великої довжини кодового обмеження малопридатні; послідовне декодування є компромісом між високими показниками ЕВК та обчислювальною складністю алгоритмів, проте

наявність низки конструктивних недоліків, у т.ч. ефекту переповнення буфера, знижує практичну цінність послідовного пошуку по ґратах; порогові декодування є найбільш обчислювально ефективним підходом, проте завдання синтезу самоортогональних та ортогоналізованих кодів у загальному випадку не вирішено, існуючі методи синтезу не дозволяють забезпечити високі показники ЕВК. Перспективним напрямом подальшого розвитку безперервних кодів є методи каскадування (паралельного та/або послідовного об'єднання), що дозволить забезпечити високі показники ЕВК за порівняно низької обчислювальної складності реалізації.

Проведемо аналіз та дослідимо відомі методи блокового завадостійкого кодування інформації, розглянемо найбільш перспективні напрямки у його розвитку.

Таким чином, найбільш важливими класами лінійних блокових кодів є циклічні коди, коди БЧХ, РС та алгеброгеометричні коди, що є теоретичним узагальненням поліноміальних кодів, що допускають опис алгебри багаточленами від однієї формальної змінної. Алгеброгеометричні коди мають хороші асимптотичні властивості і при великій довжині коду їх параметри лежать вище нижньої теоретичної кодової межі.

Для порівняння у таблиці 2 наведено порівняльні оцінки деяких методів блокового завадостійкого кодування (БК) за такими показниками:

- 1) енергетична ефективність – величина енергетичного виграшу від кодування проти декодированої передачею інформації, дБ;
- 2) можливість виправлення складних змін помилок, зокрема. довгих пакетів помилок;
- 3) обчислювальна складність реалізації алгоритмів кодування та декодування.

Таблиця 2

Порівняльні оцінки деяких блокових методів завадостійкого кодування за різними показниками

Метод завадостійкого кодування	Енергетична ефективність (ЕВК)	Можливість виправлення складних конфігурацій помилок	Складність реалізації алгоритмів кодування та декодування (SR)
БЧХ код з декодуванням алгебри	2,5–3,5	Ні	Низька
РС код з декодуванням алгебри	3,5–4,5	Так	Низька
АГ код з декодуванням алгебри	4,5–5,5	Так	Низька
Лінійний БК з м'яким декодуванням за критерієм мінімізації ймовірності помилкового прийому кодового слова	4,5–6,0	Так	Дуже висока
Лінійний БК з м'яким декодуванням за критерієм мінімізації ймовірності помилкового прийому символів кодового слова	4,5–6,0	Так	Дуже висока

Дані таблиці 2 сформовані на основі аналізу джерел науково-технічної літератури вітчизняних та зарубіжних авторів [8; 2; 4; 7; 1].

Аналіз даних, наведених у таблиці 2 свідчить, що застосування блокових завадостійких кодів призводить до значного підвищення енергетичної ефективності передачі дискретних повідомлень. Найбільш ефективні в цьому сенсі є недвійкові

лінійні блокові коди (коди РС, алгеброгеометричні (АГ) коди), які крім високого ЕВК дозволяють ефективно протистояти складним комбінаціям помилок, що групуються. Крім того, методи алгебри побудови лінійних блокових кодів і швидкі алгоритми їх декодування легко реалізуються як в програмному, так і в апаратному вигляді. У той же час слід зазначити, що в порівнянні з згортковими кодами, особливо в порівнянні з процедурами їхнього м'якого декодування (див. табл. 1) лінійні блокові коди значно поступаються досягається ЕВК. Фактично одержуване зниження ЕВК є плата за низьку обчислювальну складність реалізації лінійних блокових кодів.

Іншим не менш перспективним напрямком у розвитку теорії завадостійкого кодування є методи м'якого декодування лінійних блокових кодів за критерієм мінімізації ймовірності помилкового прийому символів кодового слова та/або за критерієм мінімізації ймовірності помилкового прийому символів кодового слова. Даний напрямок привабливо високими значеннями ЕВК, що досягається. У той же час методи м'якого декодування надзвичайно складні у практичній реалізації.

Таким чином, проведені аналіз та порівняльні дослідження показали, що існуючим методам завадостійкого кодування притаманні такі недоліки: висока складність реалізації алгоритмів синтезу та декодування по максимуму правдоподібності безперервних (деревоподібних) та лінійних блокових кодів за досить високих показників ЕВК; порівняно низькі значення ЕВК лінійних блокових кодів (порівняно з алгоритмами м'якого декодування згорткових кодів) за низької обчислювальної складності алгебраїчних методів їх синтезу та декодування.

На рис. 1 наведено загальну класифікацію каскадних кодових конструкцій із зазначенням структурно-логічних зв'язків та закономірностей у загальній методології їх побудови.

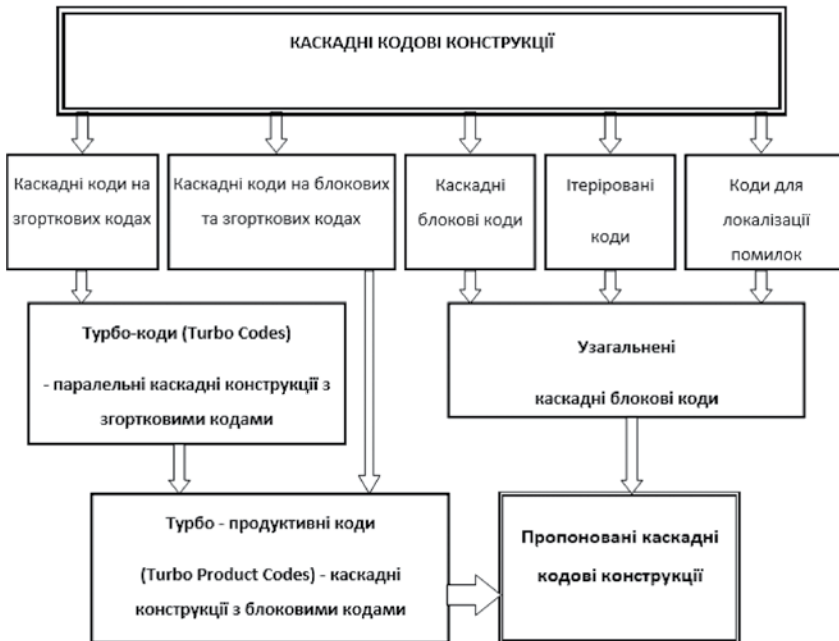


Рис. 1. Загальна класифікація каскадних кодових конструкцій

Відповідно до загальних тенденцій у розвитку теорії завадостійкого кодування методи формування каскадних кодових конструкцій також розвивалися за двома основними напрямками.

На основі подальшого розвитку першого напрямку, що оперує деревоподібними кодами з ймовірнісними процедурами синтезу та декодування кодів, у роботах [3; 5; 7] досліджено каскадні кодові конструкції на згорткових кодах у різних варіантах виконання, з різними особливостями побудови.

У роботах [7; 8; 1; 5] запропоновані каскадні схеми безперервних та блокових кодах, що отримали широке використання в сучасних системах мобільного зв'язку, протоколах передачі даних телекомунікаційних систем та мереж різного призначення [7].

Надалі, на основі каскадних кодових конструкцій з згортковими кодами та м'яких процедур декодування виник новий напрямок у теорії завадостійкого кодування – турбо-коди (паралельні каскадні кодові конструкції на рекурсивних систематичних згорткових кодах) [9; 4; 5; 8].

У розвиток другого напрямку теорії кодів, що контролюють помилки, що оперує переважно алгебраїчними процедурами синтезу та декодування кодів, у роботах [1; 2; 5] запропоновані методи та алгоритми каскадування блокових кодів, у т.ч. ітеровані коди та коди з локалізацією помилок.

Цей напрямок отримав найбільший розвиток з появою алгебраїчних методів побудови та декодування лінійних блокових кодів [8; 1; 2; 3; 7], обчислювально ефективних процедур програмної та апаратної реалізації. Надалі добре вивчені каскадні блокові коди, ітеровані коди та коди для локалізації помилок були узагальнені в новий великий клас узагальнених каскадних блокових кодів, алгебраїчна теорія побудови та декодування яких найбільш повно викладена в роботах [8; 9].

В останні роки на основі методів турбо-кодування та каскадних блокових кодів виник новий напрямок – турбо-продуктивні коди, що поєднує в собі як високу стійкість до перешкод, що забезпечується м'якими ітеративними процедурами декодування, так і низьку обчислювальну складність реалізації, властиву алгебраїчним методам блокового кодування [1; 8; 7; 9].

Зазначені особливості та переваги турбо-продуктивних кодів спонукають до подальшого розвитку даного напрямку в теорії завадостійкого кодування, удосконалення методів та алгоритмів побудови та декодування перспективних каскадних кодових конструкцій з покращеними властивостями для підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень.

Висновки. Основним і найбільш ефективним засобом забезпечення високої завадостійкості передачі дискретних повідомлень є методи надлишкового (завадостійкого) кодування. Проведений аналіз та порівняльні дослідження показали, що існують наступні недоліки в існуючих методах завадостійкого кодування: висока складність реалізації алгоритмів синтезу та декодування за принципом максимуму правдоподібності для неперервних (деревоподібних) та блокових кодів при достатньо високих значеннях ЕВК та коригування; порівняно низькі значення ЕВК та коригування лінійних блокових кодів (у порівнянні з алгоритмами м'якого декодування звичайних кодів зв'язності) при низькій обчислювальній складності алгебраїчних методів їх синтезу та декодування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Бойко Ю. М., Дружинін, В. А., Толюпа, С. В. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія. Київ : Логос, 2018.
2. Бойко Ю.М., Пятін І.С. Моделі систем завадостійкого кодування у телекомунікаціях. *Вісник Хмельницького національного університету*. № (4). С. 174–183
3. Berkman L., Turovsky O., Kyrpach L., Varfolomeeva O., Dmytrenko V., Pokotylo O. Analyzing the code structures of multidimensional signals for a continuous information transmission channel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5. №. 9. P. 70–81. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242357>
4. Березюк І., Зубенко В. Удосконалення методу м'якого декодування з використанням упорядкованих підмножин перевірочних рівнянь лінійних блокових кодів. *Scientific practice: modern and classical research methods: Collection of scientific papers "LOGOS" with Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference*. 2021. Volume. 1, Pp. 195–201. Boston – Vinnytsia : Primedia eLaunch & European Scientific Platform.
5. Приходько С.И., Гусев С.А., Зубенко В.А. Исследование методов построения каскадных кодовых конструкций для повышения помехоустойчивости передачи дискретных сообщений. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2011. № (17). С. 219–224
6. Зубенко, В.О., Мірошніченко, М.С. () Підвищення завадостійкості передачі дискретних повідомлень на основі використання каскадно-кодових конструкцій. *Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті* : матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції. 2017. Рр. 58–60. (16–17 листопада, 2017, Кропивницький).
7. Хмельницький Ю. В., Каблуков О. А. Методи та засоби забезпечення завадостійкої передачі інформації в телекомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2019. № (64). Р. 133–143.
8. Proakis D.G. Digital Communications. McGraw-Hill Science / Engineering / Math; 4th edition. August 15, 2000. 1024 p.
9. Kushnir M., Semenko A., Kosovan G., Bokla N., & Shestopal Y. Increasing the Cryptosecurity of Telecommunication Systems with Spread Spectrum by Using Pseudorandom Sequences Based on Two Ergodic Chaotic Signals. In 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies. *AICT 2019 – Proceedings*. 2019. P. 455–458. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

REFERENCES:

1. Bojko, Yu. M., Druzhinin V. A. & Tolyupa, S. V.(2018) Teoretichni aspekti pidvishennya zavadostijkosti j effektivnosti obrobki signaliv v radiotekhnichnih pristroyah ta zasobah telekomunikacijnih sistem za nayavnosti zavad [Theoretical aspects of improving immunity to interference and the efficiency of signal processing in radio technical devices and means of telecommunication systems in the presence of interference] : Monografiya. Kiyiv: Logos.[in Ukrainian].
2. Bojko, Yu.M., Pyatin, I.S. (2020) Modeli sistem zavadostijkogo koduvannya u telekomunikacijah [Models of interference-resistant coding systems in telecommunications] *Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu*, (4), 174–183. [in Ukrainian].
3. Berkman, L., Turovsky, O., & Kyrpach, L., Varfolomeeva, O., Dmytrenko, V., Pokotylo, O. (2021) Analyzing the code structures of multidimensional signals for a continuous information transmission channel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. (Vol. 5. №. 9.). 70–81 Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242357>

4. Bereziuk, I. & Zubenko, V. Udoskonalennia metodu miakoho dekoduvannia z vykorystanniam uporiadkovanykh pidmnozhyh perevirochnykh rivnian liniinykh blokovykh kodiv [Improvement of the soft decoding method using ordered subsets of check equations of linear block codes]. *Scientific practice: modern and classical research methods: Collection of scientific papers "LOGOS" with Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference*. (Volume. 1, Pp. 195–201), 2021, Boston-Vinnitsia: Primedia eLaunch & European Scientific Platform [in Ukrainian].
 5. Prykhodko, S.Y., Husev, S.A. & Zubenko V.A. (2011) Yssledovanye metodov postroyeniya kaskadnykh kodovykh konstruksiyi dlia povysheniya pomekhoustoichyvosti peredachy dyskretnykh soobshcheniy [Investigation of methods for constructing cascade code structures to improve the noise immunity of discrete message transmission]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, (17), 219–224 [in Ukrainian].
 6. Zubenko, V.O., Miroshnichenko, M.S. (2017) Pidvyshchennnia zavadostiikosti peredachi dyskretnykh povidomlen na osnovi vykorystannia kaskadno-kodovykh konstruksii [Increasing the interference resistance of the transmission of discrete messages based on the use of cascade code structures]. *Materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii. Avtomatyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnologii u promyslovosti, telekomunikatsiakh, enerhetytsi ta transporti* (Pp. 58–60), 16–17 lystopada, 2017, Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
 7. Khmelnytskyi, Yu. V., Kablukov, O. A. (2019) Metody ta zasoby zabezpechennia zavadostiikoi peredachi informatsii v telekomunikatsiinykh merezhakh [Methods and means of ensuring interference-resistant information transmission in telecommunication networks]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*, (64), 133–143. [in Ukrainian].
 8. Proakis D.G. (2000) *Digital Communications*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 4th edition (August 15, 2000). 1024 p. [in English].
 9. Kushnir M., Semenko A., Kosovan G., Bokla N., & Shestopal Y. (2019). Increasing the Cryptosecurity of Telecommunication Systems with Spread Spectrum by Using Pseudorandom Sequences Based on Two Ergodic Chaotic Signals. *In 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT 2019 – Proceedings* (pp. 455–458). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
-