

О. М. НИКУЛІНА, В. П. СЕВЕРИН, В. О. ШАРОВ

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЗАВАДОСТІЙКОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Для каналів передачі даних, що використовуються у локальних системах управління різними процесами, необхідні прості й не затратні методи, які дозволять передавати необхідну інформацію без помилок. Помилки, які трапляються у безперервних каналах зв'язку – одна з основних перепон для достовірної передачі інформації. В результаті аналізу статистики помилок у дискретних каналах зроблено висновок, що найчастіше виникають однократні та двократні помилки. Мета даної статті полягає в розробці моделі завадостійкої передачі даних для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами. Проаналізовані причини виникнення помилок – загасання сигналу, шум та різні перешкоди. Результуючий переданий сигнал визначається поєднанням корисного сигналу і сигналу перешкод. При розгляді дискретних сигналів виділено декілька причин помилок – крайові спотворення, дроблення імпульсів та інші. Розглянуті методи боротьби з завадами: засоби експлуатаційного і профілактичного характеру; засоби підвищення перешкодостійкості при передачі одиничних елементів; використання зворотного зв'язку; додавання надлишковості до коду; завадостійке кодування. Запропоновано боротись із помилками використанням завадостійкого кодування. Серед завадостійких кодів виділені надлишкові блочні розділими систематичні коди, які поділяють на циклічні коди та код Хеммінга. В основу моделі завадостійкого кодування запропоновано покласти використання систематичного коду – циклічного коду або коду Хеммінга з наступним каскадним кодуванням. Оскільки модель кодування має адаптивно використовуватись в різних системах, необхідним критерієм моделі є її універсальність. Модель повинна працювати в різних системах без зміни алгоритмів кодування та декодування. Серед багатьох видів завадостійких кодів обрано для використання каскадні коди. Розповсюджені каскадні коди є універсальними, легко масштабуються, працюють стабільно, добре себе зарекомендували у світовій практиці, тому їх рекомендовано для використання у різних інформаційних управляючих системах. Наведена реалізація моделі завадостійкої передачі даних.

Ключові слова: передача даних, завадостійкість, кодування, коригуючі коди, модель, динамічні системи, інформаційна технологія.

O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, V. O. SHAROV

DEVELOPMENT OF A MODEL OF INTERFERENCE-RESISTANT DATA TRANSMISSION FOR INFORMATION TECHNOLOGY OF CONTROL OPTIMIZATION OF DYNAMIC SYSTEMS

For data transmission channels used in local control systems for various processes, simple and inexpensive methods are needed that will allow the necessary information to be transmitted without errors. Errors that occur in continuous communication channels are one of the main obstacles to the reliable transmission of information. As a result of the analysis of error statistics in discrete channels, it was concluded that single and double errors occur most often. The purpose of this article is to develop a model of interference-resistant data transmission for information technology optimization of control of dynamic systems. The analyzed causes of errors are signal attenuation, noise and various interferences. The resulting transmitted signal is determined by the combination of the useful signal and the interference signal. When considering discrete signals, several causes of errors are highlighted – edge distortions, pulse splitting, and others. Considered methods of combating obstacles: means of operational and preventive nature; means of increasing interference resistance during the transmission of single elements; use of feedback; adding redundancy to the code; tamper-proof coding. It is proposed to combat errors using tamper-resistant coding. Among the interference-resistant codes, redundant block separable systematic codes are selected, which are divided into cyclic codes and Hamming code. The basis of the interference-resistant coding model is the use of a systematic code – a cyclic code or a Hamming code followed by cascade coding. Since the coding model must be adaptively used in different systems, a necessary criterion of the model is its universality. The model should work in different systems without changing the encoding and decoding algorithms. Among the many types of interference-resistant codes, cascade codes are chosen for use. Widespread cascade codes are universal, easily scalable, work stably, have proven themselves well in world practice, therefore they are recommended for use in various information management systems. The implementation of the interference-resistant data transmission model is presented.

Keywords: data transmission, immunity, coding, correcting codes, model, dynamic systems, information technology.

Вступ. Майже кожний персональний комп'ютер під'єднаний до єдиної світової глобальної мережі, кожне підприємство має свою локальну обчислювальну мережу. Все це складає мільярди з'єднаних пристроїв. Для забезпечення зв'язку між усіма пристроями прокладені канали, які їх зв'язують. З цього випливає велика кількість проблем зв'язку: як передати інформацію так, щоб отримувач повідомлення отримав ту ж саму інформацію, яку йому відправляли; як мінімізувати витрати на утримання каналів зв'язку та інші.

На сьогодні проблема завадостійкої передачі даних по каналам зв'язку є концептуально однією з найважливіших у теорії передачі даних. За реальних умов при передачі великих масивів даних на покращення якості інформації, що передається, і забезпечення завадостійкості інформації компанії витрачають

не менше, а іноді й більше ресурсів, ніж на генерацію та обробку цієї інформації. Тому проблема завадостійкості передачі даних є актуальною.

Завадостійкість динамічних систем. В теперішній час існує багато складних динамічних систем, управління якими вимагає використання інформаційних технологій для створення або удосконалення спеціалізованих інформаційних управляючих систем. Типовим прикладом такої складної динамічної системи є інформаційна управляюча система енергоблоку АЕС, що складається з багатьох локальних систем та потребує модернізації шляхом оптимізації різних показників якості [1, 2].

Одним із показників є якість каналів зв'язку, які використовуються для передачі інформації. Неякісні канали передачі даних, або неякісні технології, які

© О. М. Нікуліна, В. П. Северин, В. О. Шаров 2022



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



використовуються у каналах передачі даних енергоблоку АЕС, можуть призводити до позаштатних ситуацій при експлуатації різних систем на АЕС, або навіть аварій.

Проблеми можуть виникати з причини помилок, які трапляються у каналах передачі даних, що може призводити до неправильної інтерпретації даних. Наприклад, замість коду «0100110110111010», що буде означати «Температура реактора у нормі» прийде код із фазовим зсувом «0010011011011101», що буде означати «Температура реактора нижче норми», що може привести, як наслідок, до техногенної катастрофи масштабів Чорнобилю або Фукусіми.

Статистика помилок передачі даних. У табл. 1 наведені приблизні значення ймовірностей p_0 переключувань елементарних двійкових символів для різних типів каналів зв'язку. Для аналізу використовується ймовірнісний критерій, оскільки його доцільно використовувати для оцінки завадостійкості дискретних каналів зв'язку при відомих ймовірнісних характеристиках сигналу і перешкод [3].

Таблиця 1 – Ймовірності переключувань елементарних двійкових символів

Тип каналу зв'язку	Ймовірність p_0
Повітряні провідні канали	$10^{-2} - 10^{-3}$
Кабельні і хвильові канали	$10^{-4} - 10^{-6}$
Радіорелейні канали	$10^{-3} - 10^{-4}$
УКХ канали прямої видимості	$10^{-3} - 10^{-4}$
Короткохвильові канали	$10^{-1} - 10^{-2}$

Для кабельних, хвильових та більшості інших типів каналів притаманне значення ймовірності переключувань $p_0 = 10^{-4}$, тому саме для такої ймовірності розглянуто кратність помилок [3, 4].

У каналах без пам'яті, тобто у каналах, у яких ймовірність появи символу на виході з каналу залежить тільки від символу на вході до каналу, ймовірність отримання будь-якої послідовності символів на виході визначається заданою послідовністю на вході. Так ймовірність переключування n розрядів знаходиться за формулою [5]

$$P_t = C_n^t \cdot p_0^t \cdot (1 - p_0)^{n-t}, \quad (1)$$

де P_t – ймовірність помилки кратності t в кодовій комбінації;

C_n^t – число поєднань з n по t .

Наведена ймовірність переключувань (1) дає можливість проаналізувати у яких розрядах найчастіше трапляються помилки та кратність яких помилок є найбільш небезпечною через втрату достовірності інформації. Статистика помилок залежно від довжини блоку даних наведена в табл. 2, де n – загальна кількість розрядів у повідомленні, $p_{\text{мн}}$ – ймовірність помилкового прийому блоку даних розміром n , μ_n^t –

помилка кратності t при блоці розміром n [3]. Ймовірність $p_{\text{мн}}$ – це сума всіх ймовірностей помилок для всіх розрядів у комбінації за формулою (1).

Таблиця 2 – Статистика помилок

n	Кратність помилки μ_n^t у відсотках						$p_{\text{мн}}$
	1	2	3	4	5	6	
4	78	21	1	–	–	–	0.01600
9	56	32	9	3	–	–	0.00274
16	42	37	12	6	1	–	0.00400
30	40	29	13	8	5	2	0.00630

З даних табл. 2 видно, що абсолютна більшість помилок припадає на помилки кратності 1 і 2, таких помилок більше 80 %.

На рис. 1 показані графіки залежності ймовірності помилки кратності t

$$p(\mu) = p_{\text{мн}} \cdot \mu_n^t \quad (2)$$

від n та $p_{\text{мн}}$, що визначають ймовірність переключувань.

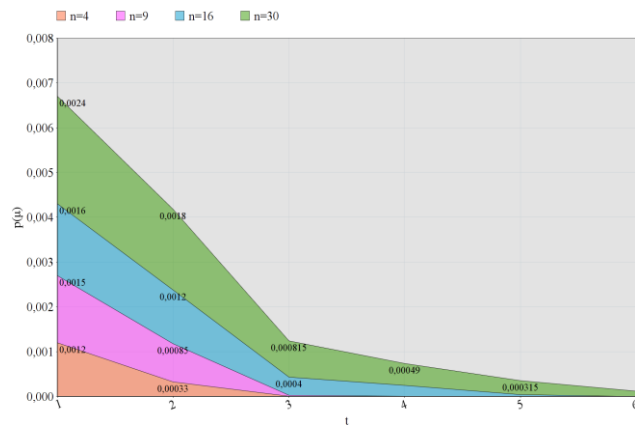


Рис. 1. Ймовірність переключувань залежно від кратності помилки та ймовірності помилкового прийому

За даним графіком помилки кратності більше 2 настільки малоймовірні, що їх можна не враховувати. Оскільки для більшості каналів зв'язку притаманне значення ймовірності переключувань $p_0 = 10^{-4}$, а сучасні канали зв'язку навіть можуть гарантувати значення $p_0 = 10^{-6}$. Оптиковолоконні канали передачі забезпечують значення p_0 від 10^{-8} до 10^{-10} [4]. Таким чином ймовірність (2) помилки кратності більше 2 настільки малоймовірні ($\approx 0,0000004$), що такі помилки на практиці можна не враховувати [4].

Мета та задачі дослідження. Мета статті полягає в розробці моделі завадостійкої передачі даних для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами. Для досягнення мети поставлено задачі.

1. Проаналізувати причини виникнення помилок.
2. Розглянути методи боротьби з завадами.
3. Побудувати завадостійку модель передачі даних.

Аналіз причин виникнення помилок. Будь-який технічний засіб може викликати помилки – ситуації, коли двійкова одиниця під впливом ряду факторів перетвориться на нуль і навпаки. Причинами виникнення помилок є загасання сигналу, шум та різні перешкоди [3].

Загасання сигналу – це зменшення значення струму, напруги або потужності сигналу, коли частина енергії сигналу розсіюється у вигляді втрат під час поширення сигналу в лінії зв'язку, що знижує чіткість прийому. Шум – це шкідливі сигнали, які поєднуються з корисним сигналом, призначеним для передачі та прийому, і спотворюють його. Білий шум (тепловий шум) – статистичний однорідний шум, що є результатом руху заряджених частинок у фізичному середовищі передачі. Перешкода – небажана енергія, що призводить до спотворення сигналу під час обробки, зберігання та передачі інформації. Перешкоди можуть виникати поза апаратними засобами, що приймають сигнал (зовнішні перешкоди), так і всередині них (внутрішні перешкоди) [5].

Розрізняють корисний сигнал $S_c(t)$, тобто. Сигнал, що несе інформацію, яку слід передати, та сигнали перешкод $S_n(t)$, що генеруються джерелами перешкод. Результуючий сигнал $\alpha(t)$ визначається поєднанням корисного сигналу і сигналу перешкод.

Якщо результуючий сигнал $\alpha(t)$ представлено у вигляді $\alpha(t) = S_c(t) + S_n(t)$, то перешкода називається адитивною. Якщо ж $\alpha(t)$ представляється у вигляді $\alpha(t) = S_c(t) \cdot S_n(t)$, то перешкода називається мультиплікативною. Якщо сигнал $S_n(t)$ є цілком визначеною функціональною залежністю, за якою можна абсолютно точно відновити корисний сигнал на основі результуючого сигналу, то відповідні перешкоди називаються регулярними [5, 6].

Якщо ж відновити вихідний сигнал неможливо, то говорять про нерегулярні перешкоди. За виглядом сигналу завад $S_n(t)$ виділяють два типи завад – шумові та імпульсні завади [3]. Шумові завади формують сигнал $S_n(t)$ як безперервну випадкову функцію часу. Такі завади найчастіше підпорядковуються нормальному закону розподілу. Імпульсні завади формують сигнал $S_n(t)$ як послідовність окремих енергетичних викидів з випадковими параметрами: амплітудою, моментом появи, тривалістю.

При розгляді дискретних сигналів виділяють декілька причин помилок. Крайові спотворення, коли зміщується фронт імпульсу, можуть утворитися з причини певної затримки t у підсилювальних генераторах, котрі по мірі проходження сигналу по каналу відновлюють сигнал для відновлення форми імпульсів. Приклад крайового спотворення показано на рис. 2, де t_{\max} та t_{\min} – межі можливого зміщення фронтів прийнятого імпульсу.

Для дискретного повідомлення таке крайове спотворення означає, що передана комбінація символів «1110» буде спотворена на комбінацію «0111» (рис. 3).

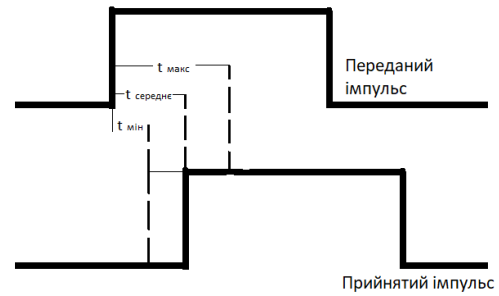


Рис. 2. Приклад крайового спотворення

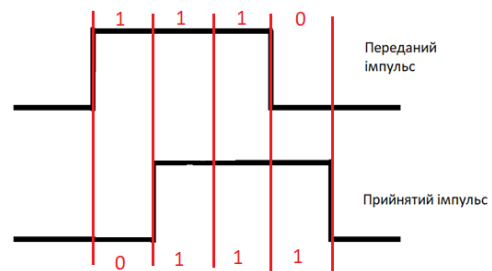


Рис. 3. Приклад крайового спотворення у дискретному форматі

Дроблення імпульсів у вигляді різкого зниження рівня або полярності сигналу у середині імпульсів є результатом нестабільності коефіцієнта передачі каналу зв'язку, імпульсних завад та інших причин. Приклад дроблення імпульсів показано на рис. 4. Причинами нестабільності коефіцієнту передачі у дротових лініях зв'язку є комутація, метеорологічні умови, перенавантаження підсилювачів, погані контакти, переключення у апаратурі.

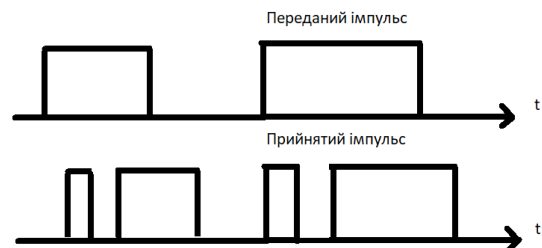


Рис. 4. Приклад дроблення імпульсів

При переході до дискретного повідомлення дроблення імпульсів буде означати, що передана комбінація символів «1111000111110» буде спотворена на комбінацію «01011100101111» (рис. 5).

Помилки під час передачі комбінацій символів можуть бути одноразовими (однократними) і багаторазовими – дворазовими (двократними), триразовими (трикратними) й так далі. З проведеного аналізу причин виникнення помилок можна зробити висновок, що помилки при передачі даних – розповсюджене явище, з яким необхідно боротися. Для того, щоб підібрати методи боротьби з завадами, необхідно проаналізувати ці методи [7, 8].

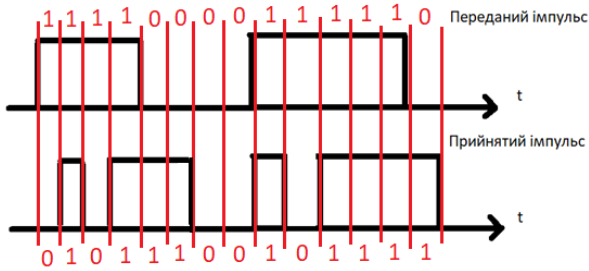


Рис. 5. Приклад дроблення імпульсів у дискретному форматі

Методи боротьби з завадами. Існує багато методів боротьби з помилками при передачі даних. У розширеному дискретному каналі, що включає дискретний канал, кодер та декодер каналу, виділяють наступні методи підвищення достовірності: засоби експлуатаційного і профілактичного характеру; засоби підвищення перешкодостійкості при передачі одиничних елементів; використання зворотного зв'язку; додавання надлишковості до коду; завадостійке кодування [4]. Засоби експлуатаційного і профілактичного характеру мають велике значення при передачі повідомлень, але вони потребують багато часу і значну кількість фінансів. Засоби підвищення перешкодостійкості дають можливість досягти легшої демодуляції та меншої ймовірності перекручувань, але при цьому є необхідність використання більш потужних модулаторів, якісніших каналів передачі, що також потребує істотно більших фінансових витрат. Використання зворотного зв'язку має як перевагу, що не потрібно ускладнювати систему та використовувати більш якісне обладнання, так і недолік – суттєве збільшення витрати часу. Додавання надлишковості до коду теж має переваги – можливість виправлення або виявлення перекручувань, відсутність необхідності використання більш якісних каналів зв'язку, а також і недолік – зниження інформативності повідомлень [7].

Аналіз цих методів боротьби з завадами обґрунтував для боротьби за завадостійкість вибір методу використання завадостійкого кодування.

Основа моделі завадостійкого кодування. Існує ціла низка завадостійких кодів. Вони різняться за своїми функціями, особливостями структури та фізичними властивостями. Класифікація завадостійких кодів показана на рис. 6. Серед завадостійких кодів перевагу мають надлишкові блочні розділимі систематичні коди. Такі коди поділяють на циклічні коди та код Хеммінга. В основу моделі завадостійкого кодування запропоновано покласти використання систематичного коду – циклічного коду або коду Хеммінга з наступним каскадним кодуванням [9].

Систематичний код має складати першу ступінь каскаду, до якої додається друга ступінь у вигляді біту перевірки на парність. Додавання біту перевірки на парність спричинить можливість виявляти помилки парної кратності, тобто до можливості виправляти однократну помилку додається ще виявлення двократної помилки, що істотно підвищить завадостійкість кодування [10].

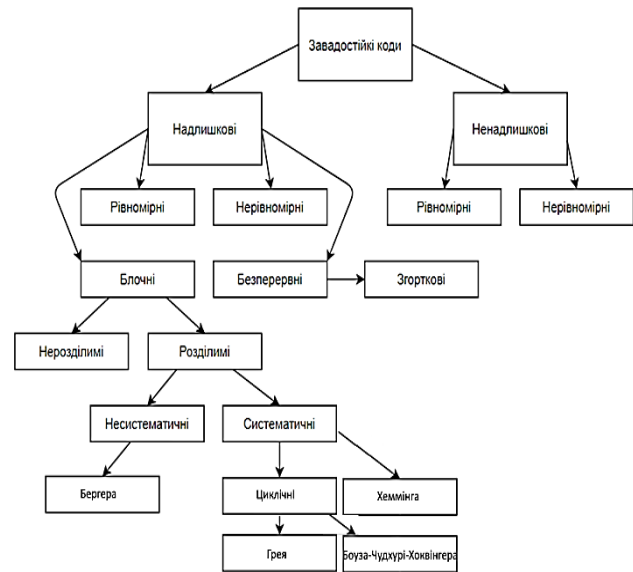


Рис. 6. Види завадостійких кодів

Побудова завадостійких кодів. Побудова завадостійких кодів можлива завдяки введенню надлишковості в код. Це означає, що для передачі інформації застосовується код, у якого в використанні знаходяться не всі доступні комбінації, а тільки деякі з них – коригувальні або надлишкові коди [7, 10, 11].

Надлишковість коду поділяється на абсолютну та відносну. Абсолютна надлишковість – кількість додаткових розрядів

$$k = n - m,$$

де n – загальна кількість елементів у комбінації або довжина комбінації;

m – загальна кількість інформаційних розрядів у комбінації.

Відносна надлишковість вказує на ту частину загальної кількості символів кодової комбінації, яку складають інформаційні символи,

$$K_{\text{відн}} = \frac{k}{n} = \frac{n-m}{n} = 1 - \frac{m}{n}.$$

Відносна надлишковість визначає швидкість передачі інформації.

Властивості коригування надлишкових кодів є залежними від побудови самих кодів та їх параметрів – числа розрядів, надмірності, тривалості символів та інших. Розглянуто загальні принципи використання надлишковості кодів [10, 11].

На вхід пристрою, що виконує кодування, надходить деяка послідовність m інформаційних двійкових розрядів. На виході цієї послідовності буде відповідати послідовність з n двійкових символів, де $n > m$. Усього може існувати 2^m різних послідовностей з 2^n , які є дозволеними кодovими комбінаціями. Інші $2^n - 2^m$ послідовності для передачі інформації не використовуються – вони є забороненими.

Помилки при передачі інформації спричиняються тим, що деякі з правильних символів, що передаються,

замінюються на інші – неправильні. Будь-яка із 2^m дозволених комбінацій може бути перевернена на будь-яку іншу. Усього таких випадків перевернення може бути $2^m 2^n$:

1) 2^m випадків безпомилкової передачі;

2) $2^m (2^m - 1)$ випадків переведення в інші дозвлені комбінації, що буде відповідати помилкам, які неможливо виявити;

3) $2^m (2^n - 2^m)$ випадків переходу у недозволені комбінації, що буде відповідати помилкам, які можливо виявити.

Частина помилкових кодових комбінацій, які можливо виявити, від загального числа можливих випадків комбінацій [8]

$$K_{\text{вияв}} = \frac{2^m (2^n - 2^m)}{2^m 2^n} = 1 - \frac{2^m}{2^n}$$

Для оцінки ступеню відмінності між двома довільними комбінаціями вихідного коду використовується характеристика у вигляді відстані між комбінаціями. Найменша відстань між дозвленими кодовими комбінаціями d_{\min} – це дуже важлива характеристика коду, тому що саме вона характеризує його коригувальні здібності.

Нехай необхідно побудувати код, який гарантовано виявляє всі помилки кратністю t і нижче. Побудувати такий код – це означає, що із множини 2^n можливих комбінацій потрібно обрати 2^m дозволених комбінацій таким чином, щоб кожна з них у сумі за модулем два з будь-яким вектором помилок вагою $w \leq t$ не давала б у результаті будь-якої дозвленої комбінації. Для цього необхідно, щоб мінімальна кодова відстань задовольняла умові

$$d_{\min} \geq t + 1.$$

Кодова відстань – це ступінь різності двох будь-яких кодових комбінацій. Для того, щоб підрахувати кодову відстань, необхідно підсумувати кількість одиниць у сумі цих комбінацій за модулем 2 [12, 13].

Реалізація моделі завадостійкої передачі даних.

Для початку роботи моделі завадостійкої передачі даних необхідно сформувати початкову кодову комбінацію, яка буде передаватися по каналу передачі даних. Тому на першому етапі виконується кодування інформаційної комбінації деяким систематичним кодом. Після цього до сформованої кодової комбінації додається біт перевірки на парність. Така комбінація вже передається по каналу.

Декодування кодової комбінації виконується за алгоритмом, блок-схема якого показана на рис. 7.

Якщо перевірка на парність і перевірка першої ступені каскадного коду не виявила помилки, то комбінація надсилається до споживача [13].

Якщо перевірка на парність не виявила помилки, але при декодуванні першого ступеню була отримана помилка, то до відправника надсилається запит про повторну відправку повідомлення. Якщо перевірка на парність не пройдена, то робиться висновок про

наявність однократної помилки. У випадку, якщо при декодуванні першого ступеню була виявлена помилка, то вона виправляється, і виправлене повідомлення пересилається споживачу. Якщо при декодуванні першого ступеню помилки не виявлено, то помилка сталась у біті перевірки на парність. Тому цей біт відкидається і комбінація передається споживачу [13].

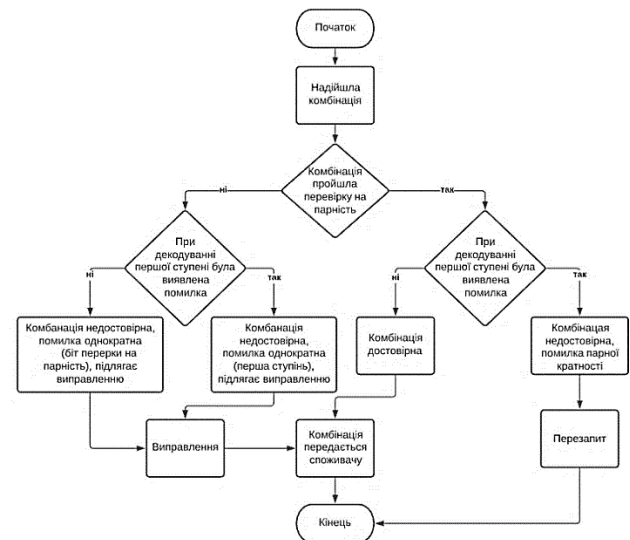


Рис. 7. Алгоритм декодування

наявності помилок у трьох з чотирьох випадків достовірна кодова комбінація надійде до споживача.

Висновки. Дана стаття присвячена розробці моделі завадостійкої передачі даних для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами. За отриманими результатами зроблені наступні висновки.

1. Наведена статистика помилок передачі даних.
2. Проаналізовані причини виникнення помилок.
3. Розглянуті методи боротьби з завадами.
4. Побудована завадостійка модель передачі даних, яка є загальним випадком використання спрощеного каскадного кодування, яка демонструє доцільну простоту використання і практичну цінність даного типу кодування, що є базою для подальшого розширення дослідження по даній темі.

Список літератури

1. Нікуліна О. М., Северин В. П., Кошоба Н. В., Бубнов А. І. Моделювання теплових процесів парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 1 (5). С. 56–61.
2. Нікуліна О. М., Северин В. П., Кошоба Н. В. Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 63–69.
3. Захарченко Н. В., Горохов С. М., Кочетков А. В. *Інформаційні параметри позиційних кодів*. Одеса: ОНАС, 2018. 212 с.
4. Bleihut R. *Theory and Practice of Error Control Codes*. 1983. 576 с.

5. Лосев Ю. І., Шматков С. І. *Основи теорії передачі інформації*. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2013. 290 с.
6. Yue Tang, Tian Mao, Bing Jiang, Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna. *Journal of Radars*. 2016. Vol. 5, № 3. P. 265 p.
7. Банкет В. Л., Івашенко П. В., Іщенко М. О. *Завадостійке кодування в телекомунікаційних системах*. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. 100 с.
8. Жураковський Ю. П., Полтораки В. П. *Теорія інформації та кодування*. Київ: Вища шк., 2001. 255 с.
9. Кожевніков В. Л., Кожевніков В. Л. *Теорія інформації та кодування*. Дніпро: Національний гірничий університет, 2011. 108 с.
10. Jones G. A., Jones J. M. *Information and Coding Theory*. London: Springer-Verlag, 2000. 210 p.
11. Шаров В. О., Бердніков А. Г. Моделювання коригувального каскадного коду в каналах передачі даних системи управління. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання у наукоємних технологіях»*. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2021. С. 298–302.
12. Yurong Guan, Zhihua Hu, Chen Chen, Xiaoming Zhu. An anti-noise transmission algorithm for 5G mobile data based on constellation selection and channel joint mapping. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60, iss. 3. P. 3153–3160.
13. Жамбаєва О., Сайлауқызы Ж. Noise immunity of data transmission over digital communication channels using convolutional coding. *Engineering Journal of Satbayev University*. 2021. № 143 (2). P. 244–251.
- control of complex dynamic systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 63–69.
3. Zakharchenko N. V., Gorokhov S. M., Kochetkov A. V. *Informatsijni parametry pozitsijnyh kodiv* [Information parameters of positional codes]. Odessa, ONAS Publ., 2018. 212 p.
4. Bleihut R. *Theory and Practice of Error Control Codes*. 1983. 576 p.
5. Losev Yu. I., Shmatkov S. I. *Osnovy teotiji peredachi informatsiji* [Fundamentals of the theory of information transfer]. Kharkiv, KhNU named V. N. Karazina Publ., 2013. 290 p.
6. Yue Tang, Tian Mao, Bing Jiang Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna. *Journal of Radars*. 2016, vol. 5, no. 3, p. 265.
7. Banket V. L., Ivashchenko P. V., Ishchenko M. O. *Zavadostijke koduvannya v telekomunatsijnyh systemah* [Interference-resistant coding in telecommunication systems]. Odessa, ONAZ named O. S. Popova Publ., 2011. 100 p.
8. Zhurakovskiy Yu. P., Poltorak V. P. *Teorija informatsiji ta koduvannya* [Theory of information and coding]. Kyiv, Vyscha shk. Publ., 2001. 255 p.
9. Kozhevnikov V. L., Kozhevnikov V. L. *Teorija informatsiji ta koduvannya* [Theory of information and coding]. Dnipro, National Mining University Publ., 2011. 108 p.
10. Jones G. A., Jones J. M. *Information and Coding Theory*. London, Springer-Verlag Publ., 2000. 210 p.
11. Sharov V. O., Berdnikov A. G. Modeluvannya koruguvalnogo kaskadnogo kodu v kanalah peredachi danyh systemy upravlinnja [Simulation of the correcting cascade code in data transmission channels of the control system]. *International scientific and technical conference "Computer simulation in scientific technologies"*. Kharkiv, KhNU named V. N. Karazina Publ., 2021, pp. 298–302.
12. Yurong Guan, Zhihua Hu, Chen Chen, Xiaoming Zhu. An anti-noise transmission algorithm for 5G mobile data based on constellation selection and channel joint mapping. *Alexandria Engineering Journal*. 2021, vol. 60, issue 3, pp. 3153–3160.
13. Zhabaeva O., Sailauqyzy Zh. Noise immunity of data transmission over digital communication channels using convolutional coding. *Engineering Journal of Satbayev University*. 2021, no. 143(2), pp. 244–251.

References (transliterated)

1. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V., Bubnov A. I. Modeluvannya teplovykh procesiv parogeneratora AES dlya informatsijnoi tekhnologii optymizatsii upravlinnja [Modeling of thermal processes of NPP steam generator for information technology of control optimization]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1 (5), pp. 56–61.
2. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Rozrobka informatsijnoi tekhnologii optymizatsii upravlinnja skladnymy dynamichnymy systemamy [Development of information technology for optimizing the

Надійшла (received) 01.11.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна – д-р техн. наук, доцент, завідувачка кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерій Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: valerii.severyn@khp.edu.ua

Шаров Владислав Олегович – аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: [0000-0003-3152-0650](https://orcid.org/0000-0003-3152-0650); e-mail: wycptpy@gmail.com

Nikulina Olena Mykolaivna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Severyn Valerii Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: valerii.severyn@khp.edu.ua

Sharov Vladyslav Olegovich – Postgraduate of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3152-0650>; e-mail: wycptpy@gmail.com