

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**ГОРЯЧЕВ ОЛЕКСІЙ ЄВГЕНІЙОВИЧ**

УДК 004.056.4

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В  
ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ  
ДВІЙКОВО-КОДОВАНИХ ПЕРЕСТАНОВОК**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор,  
**Борисенко Олексій Андрійович**,  
Сумський державний університет,  
професор кафедри електроніки і комп'ютерної техніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Кривуля Геннадій Федорович**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри автоматизації проектування  
обчислювальної техніки;

доктор технічних наук, професор,  
**Краснобаєв Віктор Анатолійович**,  
Полтавський національний технічний університет  
ім. Ю. Кондратюка, завідувач кафедри комп'ютерної  
інженерії.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.01 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради О.А. Винокурова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Процеси передачі та зберігання інформації в сучасних цифрових системах супроводжуються помилками, внаслідок різноманітних завод, що знижує достовірність передачі інформації. Одним із широко використовуваних способів, що дозволяють підвищити достовірність передачі, є надлишкове кодування, за допомогою якого отримують коди, що виявляють і виправляють помилки.

В наш час використовується багато заводостійких кодів, які в тій чи іншій мірі задовольняють необхідному в цифрових системах рівню достовірності. У той же час ці коди не позбавлені недоліків, серед яких обмеження на тип помилок, що виявляються, складність алгоритмів і пристроїв для їх реалізації, висока надмірність, труднощі адаптації до інтенсивності і характеру завод. Наявність зазначених недоліків вимагає удосконалення існуючих та розробки нових ефективних заводостійких кодів, які здійснюють безперервний контроль інформації, що передається, і надають поряд з виявленням помилок можливість їх виправлення. Крім того, ці коди повинні забезпечувати високу швидкість передачі інформації і бути простими в реалізації.

До таких кодів відносяться розроблені автором коди на двійково-кодованих перестановках, які можна вважати різновидністю ітеративних кодів. Ітеративні коди найшли широке застосування на практиці і показали себе з кращого боку. Однак рівень їх заводостійкості для ряду застосувань був недостатній і тому в ряді випадків застосовувалися більш складні способи кодування їх рядків і стовпців, що дозволяло значно підвищити глибину контролю. Однак це призводило до збільшення їх надмірності і відповідно зниження швидкості передачі інформації, а також втрати простоти реалізації пристроїв кодування і декодування. Тому актуальною залишалася задача розробки таких ітеративних кодів, які при малій надмірності, простоті пристроїв кодування і декодування і відповідно високій швидкості передачі інформації давали б можливість отримати високу достовірність її передачі, що й вирішується за допомогою ітеративних кодів на двійково-кодованих перестановках.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з планами науково-дослідних робіт Сумського державного університету в рамках держбюджетних тем кафедри електроніки і комп'ютерної техніки «Засоби кодування інформації в електронних системах» № ДР 0107U012782, «Засоби кодування и перетворення інформації в електронних системах» № ДР 0111U005727 та «Методи та засоби побудови біноміальних цифрових пристроїв для телекомунікаційних систем» № 52.21.01-01.13/14.3П.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка нових методів підвищення достовірності передачі даних в цифрових системах за допомогою надлишкових кодів на двійково-кодованих перестановках, що включають методи виявлення і виправлення помилок у двійково-кодованих перестановках, а також методи їх кодування і декодування на основі факторіальної системи числення.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

1. Аналіз відомих методів підвищення достовірності передачі інформації в циф-

рових системах.

2. Розробка методів виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках.

3. Розробка методу побудови і нумерації двійково-кодованих перестановок на основі факторіальних чисел та його оцінка.

4. Оцінка інформаційної надмірності, швидкодії та достовірності передачі інформації на основі двійково-кодованих перестановок.

*Об'єктом дослідження є процеси завадостійкої передачі і зберігання інформації.*

*Предметом дослідження є методи завадостійкого кодування інформації на основі двійково-кодованих перестановок.*

*Методи дослідження.* Результати дослідження отримані за допомогою теорії завадостійкого кодування, що дозволила розробити методи виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках; теорії інформації, що дозволила зробити оцінку достовірності та швидкодії передачі інформації на основі двійково-кодованих перестановок; методів комбінаторики і булевої алгебри, що дозволили вдосконалити метод побудови і нумерації перестановок на основі факторіальних чисел; теорії цифрових автоматів, що дозволила синтезувати структури пристроїв контролю, кодування і декодування перестановок; комп'ютерного моделювання, що підтвердило достовірність отриманих теоретичних результатів.

**Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.** В ході проведення дослідження автором були отримані наступні результати:

1. Вперше запропоновано метод виявлення помилок в двійково-кодованих перестановках, який базується на послідовному порівнянні їх двійкових елементів, що дає можливість підвищити достовірність і швидкість передачі даних.

2. Вперше запропоновано метод виявлення помилок в двійково-кодованих перестановках, який базується на підрахунку числа одиниць в стовпцях, що підвищує швидкість передачі інформації та ймовірність виявлення помилок в асиметричних каналах.

3. Вперше запропоновано метод виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках на основі підсумовування їх двійкових елементів, що дає можливість виявляти і виправляти пакети помилок.

4. Удосконалено метод побудови і нумерації перестановок на основі факторіальних чисел, який відрізняється від аналогів тим, що перетворення починається зі старшого розряду і додатково до цього відбувається сортування елементів перестановок у зростаючому порядку, що дозволяє підвищити швидкодію побудови і нумерації перестановок.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані методи виявлення та виправлення помилок у двійково-кодованих перестановках доведено до практичної реалізації у вигляді структур відповідних пристроїв їх контролю.

Методи перетворення двійкових комбінацій в перестановки і назад за допомогою факторіальних чисел доведено до практичної реалізації у вигляді структури відповідних пристроїв кодування і декодування.

Методи кодування інформації завадостійким ітеративним кодом на перестановках та методи виявлення і виправлення помилок у двійково-кодованих пере-

становках використані науково-виробничим підприємством „Преобразователь” міста Суми при розробці системи збору, зберігання, обробки та передачі даних в автоматизованій системі управління технологічним процесом розподілу електроенергії в електричних мережах.

Методи захисту даних від завад за допомогою двійково-кодованих перестановок, а також методи побудови і нумерації перестановок, запропоновані в роботі, використані в Сумському державному університеті в навчальному процесі з дисциплін «Цифрова схемотехніка», «Основи теорії кодування», «Електронні системи керування і регулювання», а також при виконанні дипломних проектів і випускних робіт магістрів.

**Особистий внесок автора.** Всі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, одержані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі результати: у [1] – запропоновано використання методу генерації перестановок на основі факторіальних чисел в електронних системах; у [7] – удосконалено метод перетворення факторіальних чисел на перестановки на основі доповнюючого масиву; у [8] – запропоновано методи виявлення помилок в перестановках на основі контрольних сум та порівняння елементів; у [9] – проведено оцінку імовірності виявлення помилок у перестановках; у [10] – запропоновано методи виправлення помилок в перестановках за допомогою індикації елементів та їх перехресного контролю; у [11] – запропоновано методи виявлення помилок в стовпцях перестановок; у [12] – удосконалено метод генерації перестановок на основі факторіальних чисел; у [14] – проведено аналіз властивостей перестановок, що дозволяють виявляти та виправляти помилки; у [15] – запропоновано використання методу нумерації перестановок на основі факторіальних чисел в електронних системах; у [16] – запропоновано структуру пристрою генерування перестановок; у [17] – запропоновано структуру пристрою для перетворення двійкових чисел у факторіальні числа на основі двійкових і факторіальних лічильників; у [18] – запропоновано структуру пристрою, що виявляє помилки у перестановках на основі порівняння їх елементів; у [19] – набули подальшого розвитку методи виявлення та виправлення помилок в перестановках, які використовують їх властивості; у [20] – запропоновано метод перетворення двійкових кодів на перестановки; у [21] – вдосконалено метод формування перестановок для використання у комп’ютерних системах; у [22] – проведено оцінку завадостійкості коду на перестановках; у [23] – отримав подальший розвиток метод формування перестановок на основі факторіальних чисел; у [24] – запропоновано структуру пристрою для перебору перестановок, що базується на використанні факторіального лічильника; у [25] – запропоновано методи кодування економічної інформації на основі перестановок.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях: Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (Kaohiung, Taiwan, 2008р.); 12-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (Харків, ХНУРЕ, 2008р.); Міжнародна науково-практична конференція «ІНФОТЕХ-2009» (Севастополь, СевНТУ, 2009р.); II міжнародна науково-практична конференція «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інфо-

рмації» (Вінниця, ВНТУ, 2009р.); Міжнародний симпозіум «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XXXV)» (Київ, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, 2009р.); Всеукраїнська науково-практична конференція «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» – (Київ, КПІ, 2009р.); Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" (Вінниця, ВНТУ, 2010р.); Інформаційні процеси і технології «Інформатика 2010»: Третя міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів (Севастополь, СевНТУ, 2010р.); 16-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (Харків, ХНУРЕ, 2012р.); International conference "Computer Algebra and Information Technology", (Одеса, ОНУ, 2012р.); 22-а міжнародна конференція «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (Севастополь, 2012р.); 12-а міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-12 2013)» (Одеса, ОНАЗ, 2013р.), а також на конференціях і наукових семінарах кафедри Електроніки і комп'ютерної техніки СумДУ.

**Публікації.** Результати наукових досліджень по дисертаційній роботі опубліковано у 25 друкованих працях, серед яких 10 статей у виданнях, що входять до переліків наукових фахових видань України з технічних наук (з них 6 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 5 одноосібних статей), 1 стаття в закордонному виданні, 12 публікацій в збірниках робіт міжнародних наукових конференцій (з них 1 за кордоном), 1 патент та 1 стаття в іншому виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 170 с., У тому числі: основний текст дисертації – 143 с., 36 рисунків по тексту (з них 1 на окремій сторінці), 12 таблиць по тексту, 3 додатки на 12 с., список використаних джерел з 113 найменувань на 11 с.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи: обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведено дані про публікації, особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві та відомості про апробацію результатів дослідження.

У **першому розділі** на основі аналізу літературних джерел і відомих теоретичних положень були розглянуті різні методи забезпечення захисту даних від завад в цифрових системах. Був проведений огляд існуючих видів каналів зв'язку і характерних для них завад, внаслідок чого обґрунтовано застосування інформаційної надмірності в перестановках з метою підвищення завадостійкості передачі даних в цифрових системах.

Виконано огляд існуючих методів формування перестановок. Зроблено висновок, що для вирішення поставленого завдання може бути ефективно застосований метод, що використовує факторіальні числа, як проміжний крок при переході від кодованих двійкових даних до перестановок.

Запропонована структура системи передачі даних, в якій для забезпечення її завадостійкості використовуються двійково-кодовані перестановки (рис. 1).

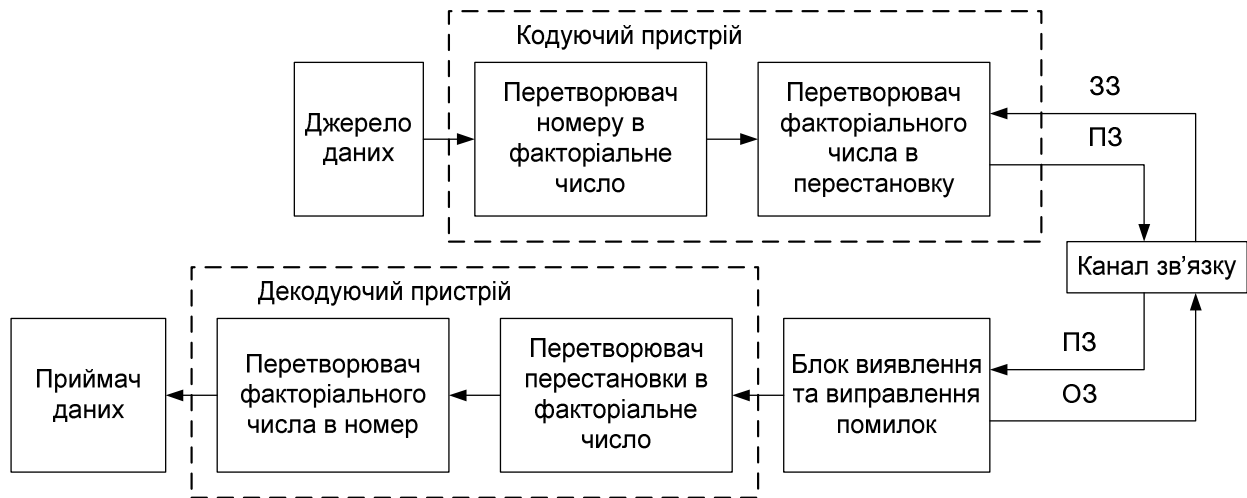


Рисунок 1 – Завадостійка система передачі даних на перестановках

У другому розділі вирішена задача розробки методів виявлення та виправлення помилок, що використовують властивості двійково-кодованих перестановок і запропонована їх реалізація у вигляді алгоритмів. Досліджено швидкодію і глибину контролю помилок запропонованих методів.

Множина, що складається з перестановок певної довжини  $n$ , утворює код на перестановках, що складається з числа комбінацій  $Z_{пер} = n!$ . Перестановки, в яких кожен елемент представлений в двійковому вигляді, названі двійково-кодованими, а код, який утворюється їх множиною, називається двійковим кодом на перестановках. Множина двійково-кодованих перестановок, що складається з  $Z_{пер} = n!$  перестановок довжини  $n$ , входить як підмножина в універсальну множину двійкових комбінацій, число яких  $Z = n^n$ . Тому двійково-кодовані перестановки при їх передачі по каналу зв'язку можуть під впливом завад випадковим чином переходити як у заборонені комбінації, число яких  $Z_{запр} = n^n - n!$ , так і в дозволені комбінації, що представляють собою двійково-кодовані перестановки, число яких дорівнює  $Z_{пер} = n!$ . При першому переході помилки можуть бути виявлені, а при другому – ні.

Досягти більшої глибини контролю помилок при незмінній кількості двійково-кодованих перестановок можна збільшенням числа заборонених комбінацій. Однак таке збільшення призводить до зниження швидкості передачі інформації, так як в цьому випадку в перестановках з'являється надлишкова інформація.

Доведено, що мінімальна кодова відстань у найпростішому коді на двійково-кодованих перестановках, при кодуванні їх елементів послідовністю чисел, починаючи з нуля, дорівнює 2.

Доведено, що при довжині двійково-кодовані перестановок  $n \rightarrow \infty$  число заборонених комбінацій  $Z_{запр} \rightarrow n^n$ , а ймовірність виявлення помилки кодом на двійково-кодованих перестановках прямує до 1. При цьому частка виявлених комбінацій, що визначається як відношення числа  $Z_{запр}$  заборонених комбінацій до їх загального числа  $Z = n^n$ , знаходиться як

$$D = \frac{Z_{занр}}{Z} = \frac{n^n - n!}{n^n}. \quad (1)$$

Проведено порівняння частки виявлених помилок  $D$  коду на двійково-кодированих перестановках і поширеного на практиці завадостійкого ітеративного коду (рис. 2). На графіку рис. 2 параметром  $n$  для коду на двійково-кодированих перестановках є довжина перестановок, а для ітеративного коду – число рядків матриці коду, число стовпців матриці коду визначається як  $\lceil \log_2 n! \rceil$ .

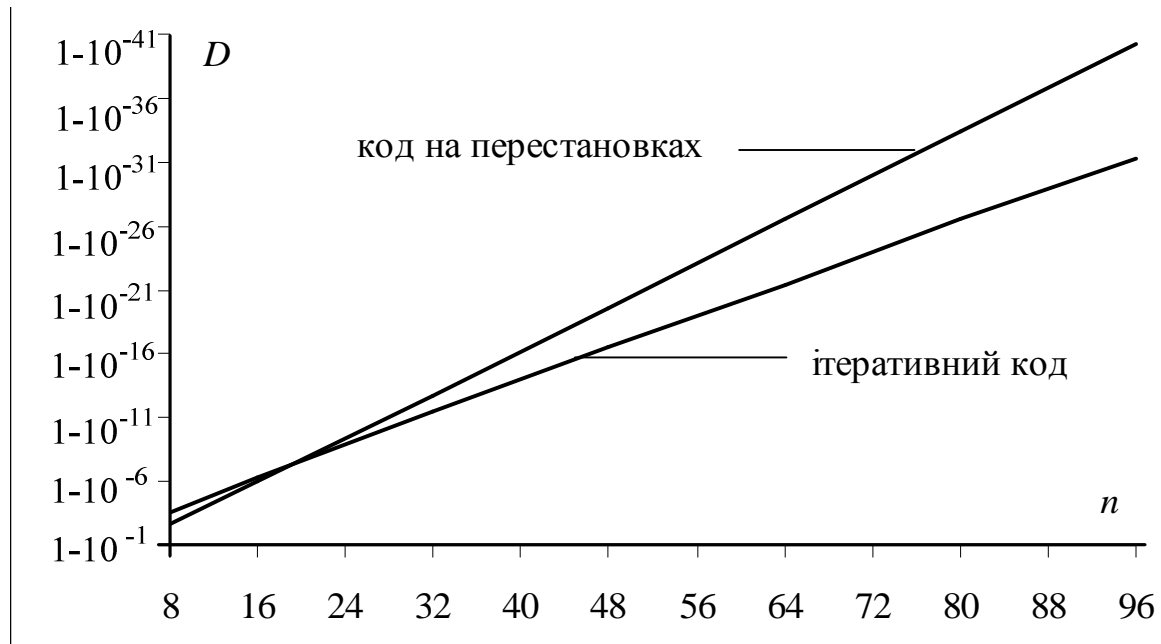


Рисунок 2 – Порівняння частки  $D$  виявлених помилок коду на перестановках і ітеративного коду

Доведено, що будь-яка перестановка може перейти шляхом зміни місць її елементів в будь-яку з решти  $n! - 1$  перестановок. У роботі розглядаються тільки переходи 2 і 3 елементів через те, що переходи більш високої кратності мало ймовірні. Для кожного поєднання  $i = 2, 3$  елементів з їх числа  $n$  вихідної перестановки мається відповідно 1 і 2 інверсні перестановки (тобто такі, в яких розташування всіх елементів відрізняється), одержувані в процесі циклічного зсуву вихідної перестановки. Звідси число невиявлених переходів кратності 2, 3 перестановки довжини  $n$  визначається як

$$V = \sum_{i=2}^3 (i-1)C_n^i. \quad (2)$$

Ймовірність невиявлених переходів кратності  $i = 2, 3$  дорівнює

$$Q(V) = \sum_{i=2}^3 (i-1)C_n^i q^i p^{n-i}. \quad (3)$$



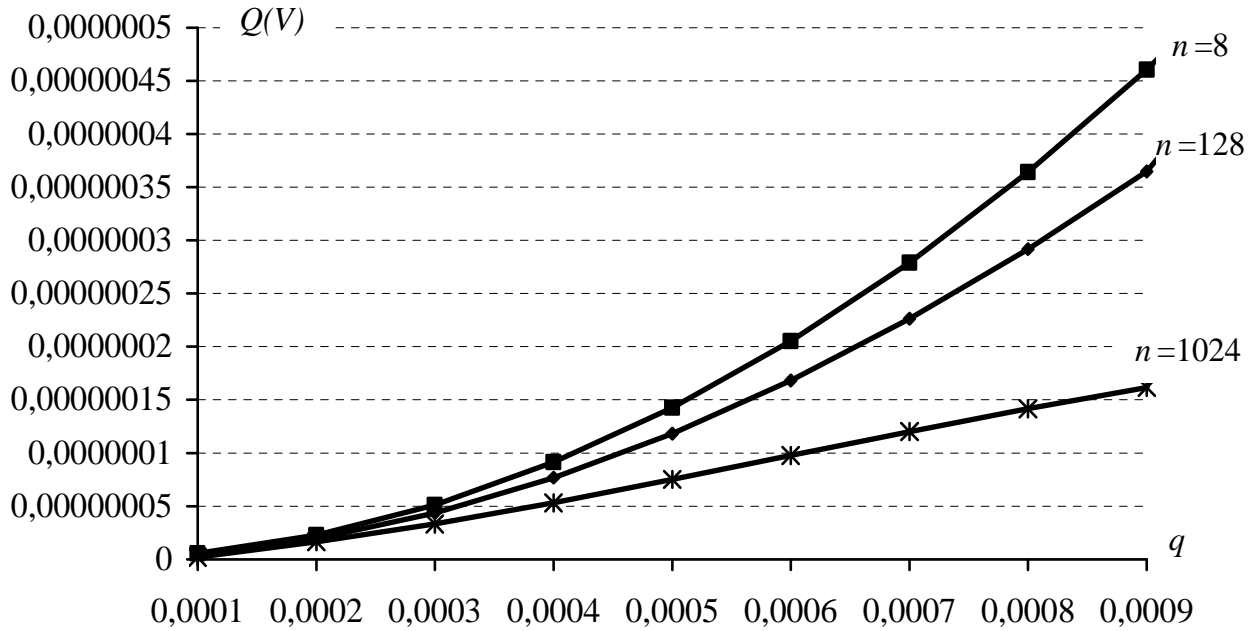


Рисунок 3 – Залежність ймовірності  $Q(V)$  невиявлених переходів кратності 2, 3 від ймовірності  $q$  помилки в елементі перестановки

Абсолютна надмірність коду на двійково-кодованих перестановках

$$I = n \cdot \log_2 n - \log_2 n!, \quad (4)$$

при  $n \rightarrow \infty$  необмежено зростає.

Відносна надмірність

$$R = \frac{n \cdot \log_2 n - \log_2 n!}{n \cdot \log_2 n} = 1 - \frac{\log_2 n!}{n \log_2 n}, \quad (5)$$

при довжині перестановок  $n \rightarrow \infty$  прямує до 0.

Тоді швидкість передачі інформації

$$V = \frac{\log_2 n!}{n \cdot \log_2 n}, \quad (6)$$

що визначається як величина  $V = 1 - R$ , при  $n \rightarrow \infty$  и  $R \rightarrow 0$  наближається до свого максимуму – 1. Це означає, що код на двійково-кодованих перестановках при великих довжинах кодових комбінацій наближається до коду з максимальною швидкістю передачі інформації. Отже, слід прагнути до передачі повідомлень у вигляді двійково-кодованих перестановок якомога більшої довжини, тому що при цьому збільшується як ймовірність виявлення помилок, так і швидкість передачі інформації (див. рис. 4).

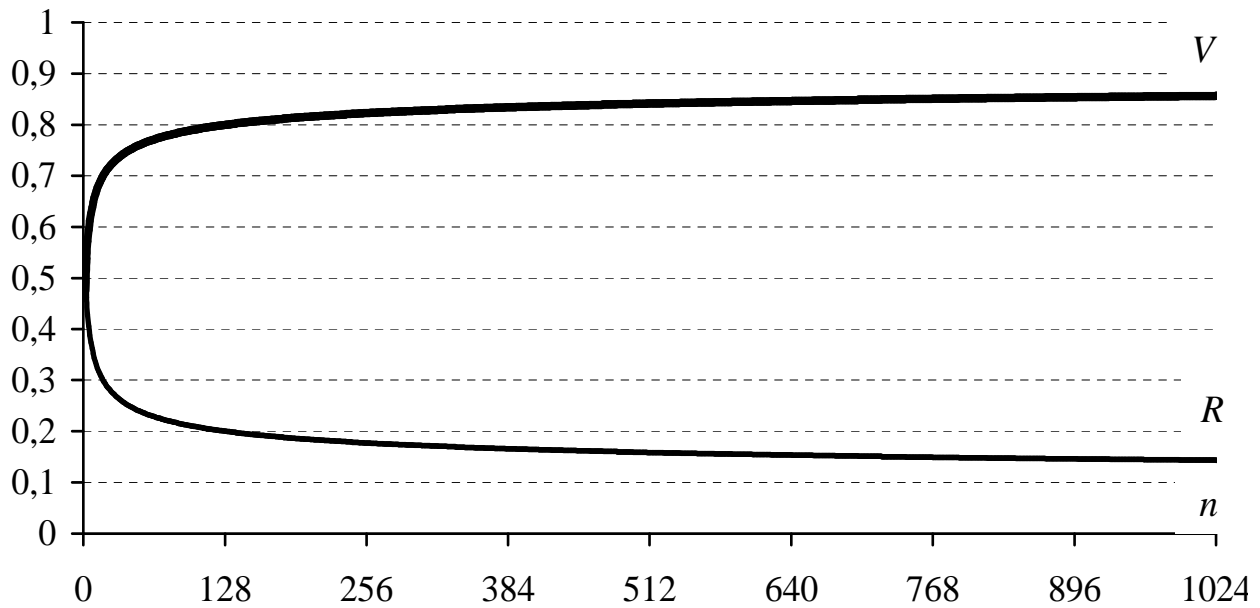


Рисунок 4 – Залежність відносної надмірності  $R$  і швидкості передачі інформації  $V$  від довжини  $n$  перестановок

При розрахунку надмірності двійково-кодованих перестановок слід враховувати, що при їх довжині  $n = 2, 4, \dots$ , тобто кратної ступеню двійки, для кодування їх елементів використовуються всі можливі двійкові комбінації довжиною рівною двійковому логарифму від  $n$ . Якщо ж довжина перестановок не кратна ступеню двійки, то існують невикористовувані комбінації, які є забороненими, число яких  $N_3 = n - 2^k$ . Вони вносять надмірність, яку можна при необхідності використовувати для виявлення та виправлення помилок. У даній роботі розглядаються тільки такі двійково-кодовані перестановки, які містять всі можливі двійкові комбінації довжини рівній  $\log_2 n$ , тобто повні двійково-кодовані перестановки.

В основі запропонованих в роботі методів виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках лежать такі їх властивості:

*Властивість 1.* Число перестановок довжини  $n$  в їх коді дорівнює  $n!$ .

*Властивість 2.* Серед номерів елементів перестановки не може бути два таких  $p_j$  і  $p_k$  ( $j, k = 0, 1, \dots, n-1, j \neq k$ ), що  $p_j = p_k$ .

*Властивість 3.* Сума номерів елементів перестановки довжини  $n$

$$S = \frac{n \cdot (n-1)}{2}. \quad (7)$$

*Властивість 4.* Для повних двійково-кодованих перестановок будь-який з їх елементів може бути отриманий шляхом додавання за модулем 2 значень всіх розрядів інших її  $n - 1$  елементів.

На основі розглянутих властивостей двійково-кодованих перестановок пропонуються наступні методи виявлення помилок в них:

1. Метод виявлення помилок на основі контрольних сум у двійково-кодованих перестановках. Даний метод дозволяє виявляти помилки після прийому всього блоку інформації. Для того щоб визначити помилку в переданій двійково-

кодованій перестановці, необхідно знайти цілочислену суму номерів її елементів, представлених в двійковому вигляді, і порівняти з двійковою контрольною сумою, яка визначається за формулою (7).

2. Метод виявлення помилок в двійково-кодованих перестановках по модулю два і кількості одиниць в стовпцях, який застосовується для кодів на двійково-кодованих перестановках довжини, кратної ступеню двійки при їх передачі по стовпцях. Метод забезпечує глибину контролю помилок, що аналогічна глибині контролю рівноважних кодів.

3. Метод виявлення помилок на основі поелементного порівняння двійково-кодованих перестановок, що дозволяє виконувати перезапиту тільки тих елементів, в яких виявлені помилки. Ознакою помилки є наявність при порівняннях двох і більше однакових елементів у двійково-кодованій перестановці. Саме ці елементи необхідно викликати при перезазпиті. Якщо довжина двійково-кодованої перестановки не кратна ступеню двійки, то крім порівняння всіх елементів двійково-кодованої перестановки один з одним також потрібно порівняння їх з найбільшим елементом, що дозволяє виявляти помилки з переходом елементів в область заборонених значень.

Недоліком останнього методу є велика кількість операцій порівняння елементів двійково-кодованої перестановки  $C_p$ :

$$C_p = (n-1) + (n-2) \dots + 2 + 1 = \frac{n \cdot (n-1)}{2}. \quad (8)$$

Для усунення даного недоліку запропоновано наступне перетворення. При перевірці на наявність помилок елементи двійково-кодованої перестановки записуються в спеціальну область пам'яті на позиції, що відповідають значенням цих елементів. Запис двох або більше елементів в одну і ту ж позицію є індикацією помилки. Таке перетворення дозволяє скоротити кількість операцій виявлення помилок до значення

$$Q_{00} = 2n + q_0, \quad (9)$$

де  $q_0$  – кратність помилки в повідомленні.

Показано, що код на двійково-кодованих перестановках при передачі його по несиметричному каналу, в якому наявні тільки переходи з 0 в 1 або з 1 в 0, здатен виявляти всі помилки.

Для виправлення помилок у двійково-кодованих перестановках використовуються надлишкові розряди контролю на парність по модулю 2 їх двійково-кодованих елементів, що призводять до ітеративного коду на двійково-кодованих перестановках з обмеженнями, що підвищують глибину контролю помилок. Даний ітеративний код на двійково-кодованих перестановках здатний виправляти як всі одиночні помилки, так і їх пакети з непарною кратністю помилок, що не перевищує округленого в більшу сторону двійкового логарифма від довжини двійково-кодованої перестановки  $n$ . Тому ефективність ітеративного коду на двійково-

кодованих перестановках буде рости зі збільшенням довжини перестановки, так як показано на рис. 5.

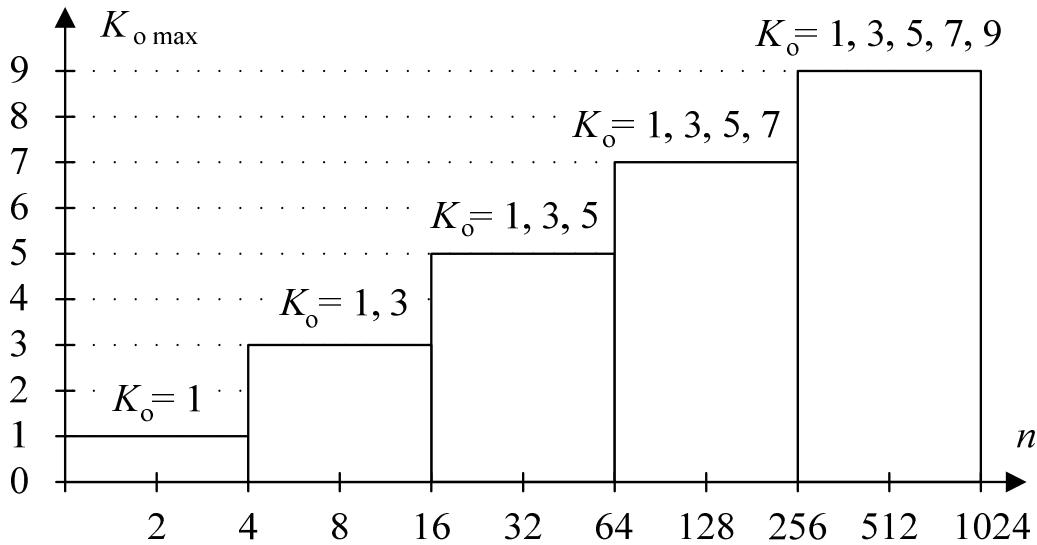


Рисунок 5 – Залежність кратності  $K_o$  помилок, що виправляються ітеративним кодом на перестановках, від довжини  $n$  перестановок

Пакети помилок парної кратності в ітеративному кодi на двійково-кодованих перестановках будуть тільки виявлятися. При цьому частка виявлених помилок в порівнянні із звичайним ітеративним кодом збільшиться.

Виправлення помилок у ітеративному кодi на двійково-кодованих перестановках може здійснюватися двома методами. У першому з них відбувається виявлення помилкового двійково-кодованого елемента перестановки шляхом контролю на парність всіх його двійкових розрядів (контроль за строками), а далі відбувається логічне додавання на парність однойменних двійкових розрядів всіх інших елементів (додавання по стовпцях) і заміна спотвореної двійкової комбінації результатом такого складання. У підсумку досягається простота виправлення помилок і його висока швидкодія, що особливо важливо при апаратній реалізації даного методу. Другий метод виробляє віднімання правильних елементів двійково-кодованої перестановки з заздалегідь відомої контрольної суми всіх її елементів, значення якої визначається за формулою (7). Другий метод може бути застосований не лише при двійковому кодуванні елементів перестановки, а й при будь-якому іншому їх кодуванні, наприклад, при десятковому. Він може бути більш ефективним при програмній реалізації виправлення помилок.

У **третьому розділі** удосконалено методи побудови і нумерації перестановок, що використовують факторіальну систему числення як проміжний крок при переході від вихідної двійкової інформації до двійково-кодованих перестановок і назад. Нумераційна функція для факторіальної системи числення має вигляд:

$$F_{\langle \phi \rangle} = X_n \cdot n! + X_{n-1} \cdot (n-1)! + \dots + X_m \cdot m! + \dots + X_1 \cdot 1! + X_0 \cdot 0!, \quad (10)$$

де  $m = 0, 1, \dots, n$ ;  $0 \leq X_m \leq m$ .

Вона перетворює двійкові числа в факторіальні за допомогою методу, який на відміну від відомого методу ділить перетворюване двійкове число на основу факторіальної системи числення, починаючи з максимальної основи. Це дозволяє значно прискорити процес перетворення двійкових чисел в перестановки за рахунок отримання цифр факторіального числа, починаючи зі старшого розряду.

Запропоновано метод перетворення факторіальних чисел в двійково-кодовані перестановки, який на відміну від відомого раніше методу дозволяє одержувати готові елементи перестановки до закінчення перетворення і, таким чином, підвищує швидкість передачі двійково-кодованих перестановок. Ще однією відмінністю запропонованого методу є сортування елементів двійково-кодованих перестановок у зростаючому порядку, що дозволяє підвищити швидкодію їх побудови.

Він передбачає наступні кроки:

Крок 1. Дано факторіальне число  $F = f_{n-1} f_{n-2} \dots f_1 f_0$ .

Крок 2. Цифра  $f_{n-1}$  старшого (n-1) розряду факторіального числа  $F$  вважається першим  $p_1$  елементом двійково-кодованої перестановки.

Крок 3. Перевірка, чи була перетворена остання цифра факторіального числа. Якщо так, то перехід до кроку 8.

Крок 4. Сортування отриманих елементів двійково-кодованої перестановки в порядку зростання їх значень.

Крок 5. Перетворювана цифра  $f_j$  ( $j = n-2 \dots 0$ ) факторіального числа порівнюється з найменшим з раніше отриманих елементів перестановки, за винятком тих елементів, з якими вже порівнювалася раніше. Якщо її значення більше значення елемента, то вона збільшується на 1. Якщо ні, перехід до кроку 6.

Крок 6. Перевірка, чи порівнювалося значення перетворюваної цифри факторіального числа з останнім з раніше отриманих елементів двійково-кодованої перестановки. Якщо ні, то перехід до кроку 4.

Крок 7. Перетворена цифра факторіального числа  $f_j$  записується як елемент двійково-кодованої перестановки  $p_{n-j}$ . Перехід до кроку 3.

Крок 8. Сформовані елементи двійково-кодованої перестановки  $P$  записуються послідовно в порядку зростання їх номерів:  $P = p_1 p_2 \dots p_{n-1} p_n$ .

Для запропонованого методу була доведена можливість перетворення кожного факторіального числа в двійково-кодовану перестановку, при цьому кожне  $n$ -розрядне факторіальне число породжує тільки йому відповідну двійково-кодовану перестановку з  $n$  елементів.

Була проведена оцінка швидкодії запропонованого методу, який передбачає послідовне виконання всіх операцій перетворення. За критерій оцінки швидкодії було прийнято кількість операцій порівняння, необхідне для перетворення факторіального числа в двійково-кодовану перестановку

$$Q'_{\text{ср}} = \frac{(n-1) \cdot (n+2)}{4}. \quad (11)$$

Порівняння формули (11) з аналогічною формулою для відомого методу показало, що запропоновані удосконалення дозволили значно знизити кількість опе-

рацій порівняння і досягти більш високої швидкості перетворення в порівнянні з відомим раніше методом при апаратній реалізації.

Була проведена оцінка швидкодії методу при його програмній реалізації, коли всі операції перетворення виконуються послідовно. При цьому враховувалося загальне число всіх операцій перетворення факторіального числа в двійково-кодовану перестановку, що залежать від довжини перестановок. Для запропонованого методу:

$$Q_{1\text{cp}} = (n - 1) \cdot (3n + 4) / 4. \quad (12)$$

Для відомого методу:

$$Q_{2\text{cp}} = 3n \cdot (n - 1) / 4. \quad (13)$$

З метою зменшення кількості операцій перетворення в розробленому методі було запропоновано використовувати область пам'яті, що заповнюється нулями і одиницями таким чином, що всі операції перетворення факторіального числа в перестановку зводяться до читання і запису в цю пам'ять, названу доповнюючим масивом. Була отримана формула для розрахунку кількості операцій перетворення факторіального числа в двійково-кодовану перестановку:

$$Q_{3\text{cp}} = (n - 1) \cdot (n + 4) / 4. \quad (14)$$

За допомогою отриманих формул (12 – 14) була проведена оцінка приросту швидкодії за рахунок використання запропонованого удосконалення методу (рис. 6).

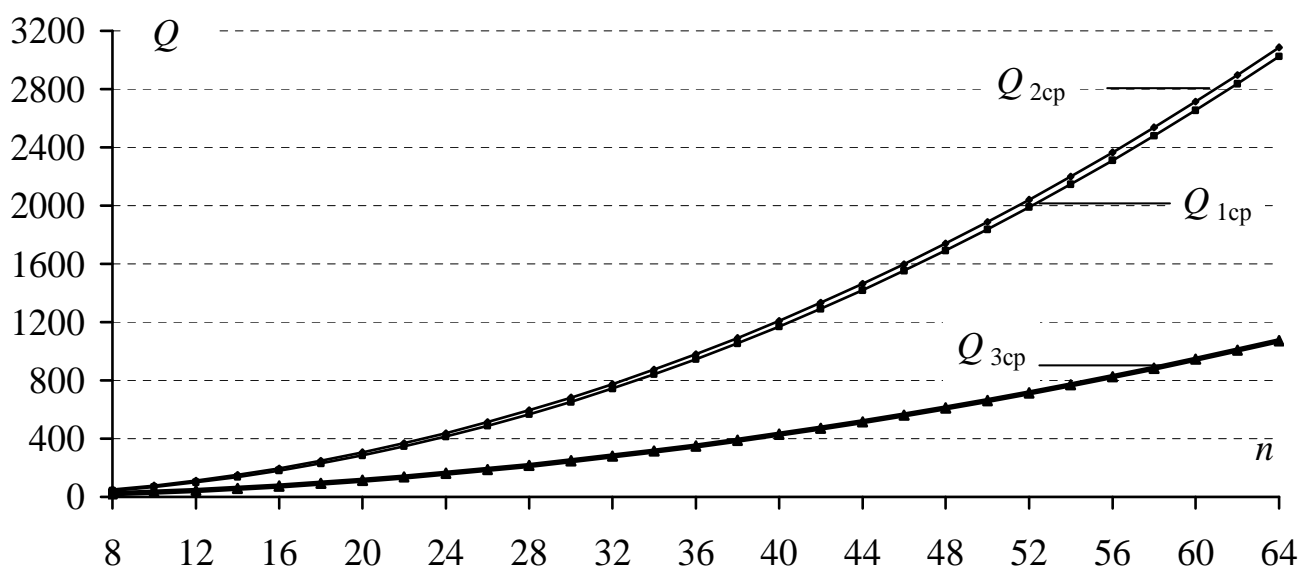


Рисунок 6 – Кількість  $Q$  операцій перетворення факторіального числа в двійково-кодовану перестановку

За допомогою факторіальних чисел вирішується також задача зворотного перетворення двійково-кодованих перестановок у відповідні їм двійкові числа, тобто

виконується завдання нумерації двійково-кодованих перестановок. Для цього потрібно по заданій перестановці знайти відповідне факторіальне число і потім за допомогою числової факторіальної функції (10) отримати номер перестановки.

Метод переходу від двійково-кодованої перестановки до факторіального числа містить наступні кроки:

Крок 1. Дана двійково-кодована перестановка  $P = p_1 p_2 \dots p_{n-1} p_n$ .

Шаг 2. Цифрою  $f_{n-1}$  факторіального числа вважається перший елемент  $p_1$  двійково-кодованої перестановки  $P$ .

Крок 3. Перевірка, чи була отримана остання цифра факторіального числа. Якщо так, то необхідно перейти до кроку 6.

Крок 4. Цифрі факторіального числа  $f_{n-i}$  присвоюється значення елемента двійково-кодованої перестановки  $p_i$  ( $i = n-2, n-3, \dots, 1, 0$ ) за вирахуванням кількості одиниць, що дорівнює кількості елементів  $p_1 \dots p_{i-1}$ , менших за  $p_i$ .

Крок 5. Якщо отримана цифра факторіального числа  $f_{n-i}$  не знаходиться в молодшому розряді, то відбувається перехід до наступної цифри факторіального числа:  $i = i-1$ , перехід до кроку 4.

Крок 6. Сформовані цифри факторіального числа  $F$  записуються послідовно, починаючи з  $f_{n-1}$  і закінчуючи  $f_0$ :  $F = f_{n-1} f_{n-2} \dots f_1 f_0$ .

Дослідження методу зворотного перетворення двійково-кодованих перестановок в факторіальні числа показало, що за швидкістю він не відрізняється від методу прямого перетворення факторіальних чисел в двійково-кодовані перестановки. Застосування до методу зворотного перетворення описаних вище удосконалень методу прямого перетворення також дає аналогічний приріст його швидкодії.

У **четвертому розділі** розробляються пристрої кодування інформації за допомогою коду на двійково-кодованих перестановках як додаток запропонованих у роботі методів. Розглядається два способи отримання факторіального числа – за допомогою поділу на основи факторіальної системи числення і за допомогою використання підсумовуючого і віднімаючого лічильників.

Розроблено структуру факторіального лічильника, що здійснює перебір всіх факторіальних чисел певної розрядності. На основі даного лічильника розроблена структура пристрою формування двійково-кодованих перестановок (рис. 7).

Розглянуто роботу пристрою перебору двійково-кодованих перестановок. З виходу першого лічильника двійкова комбінація надходить на вхід першого дешифратора і перетворюється в одиничний сигнал на його виході. Даний сигнал подається на вхід першого комутатора і відкриває для передачі на вхід блоку порівняння комбінацію з виходів блоку перетворення. На другий вхід схеми порівняння подаються раніше отримані елементи двійково-кодованих перестановок з блоку сортування. Вибір регістру, комбінація з виходів якого буде передана на вхід блоку порівняння, здійснюється за допомогою другого лічильника і другого дешифратора. Якщо перетворювана цифра факторіального числа дорівнює елементу перестановки, з яким порівнюється, або більше його, то вона збільшується на 1 і порівнюється з наступним елементом перестановки. Якщо ж цифра факторіального числа менше елемента перестановки, то вона без змін записується в пам'ять блоку сортування, в якому був записаний елемент перестановки, з яким відбувалося порівняння. При цьому відбувається перезапис значень елементів перестановки в блоці сортування в наступний за номером регістр, починаючи з

порівнюваного елемента. У разі, коли цифра факторіального числа більше або дорівнює останньому елементу перестановки з раніше отриманих елементів, вона збільшується на 1 і записується в перший незаповнений елемент пам'яті блоку сортування.

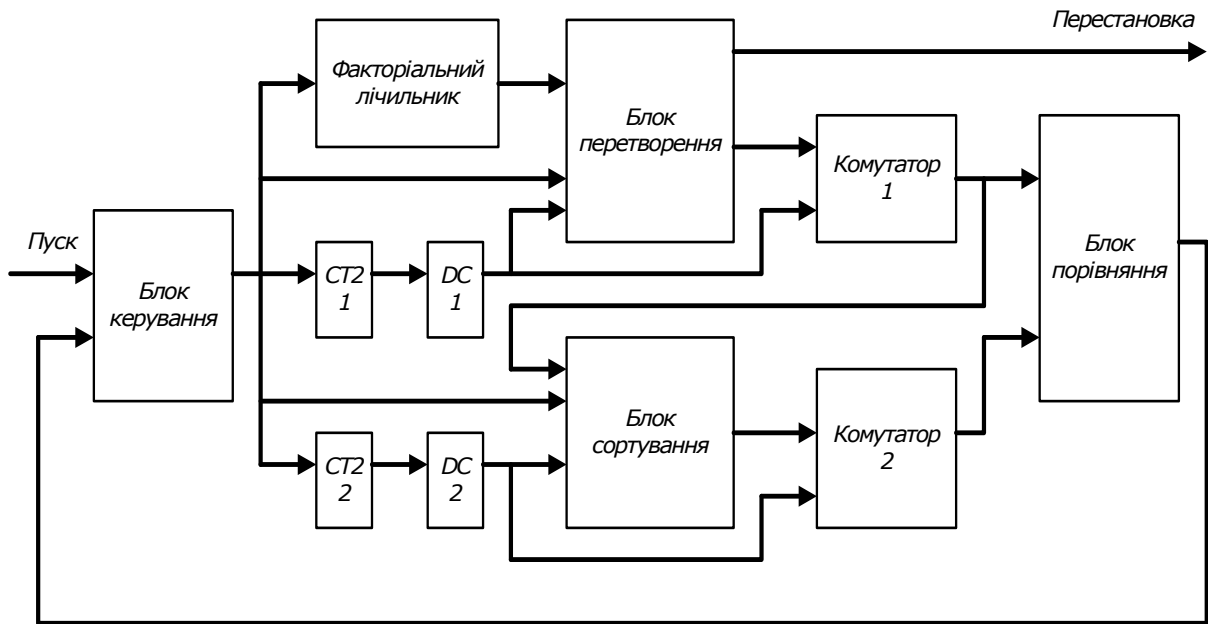


Рисунок 7 – Схема пристрою формування перестановок

Розглянуто структури пристроїв виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках, розроблені на основі запропонованих методів.

Досліджено можливості впровадження запропонованих в роботі методів і пристроїв в комп'ютерній мережі установи, де передача даних між вузлами здійснюється за поширеним протоколом ІЕС1107. Дослідження показало зменшення ймовірності невиявлення помилки на 2 порядки, як показано на рис. 8 і збільшення частки виправлених помилок на порядок.

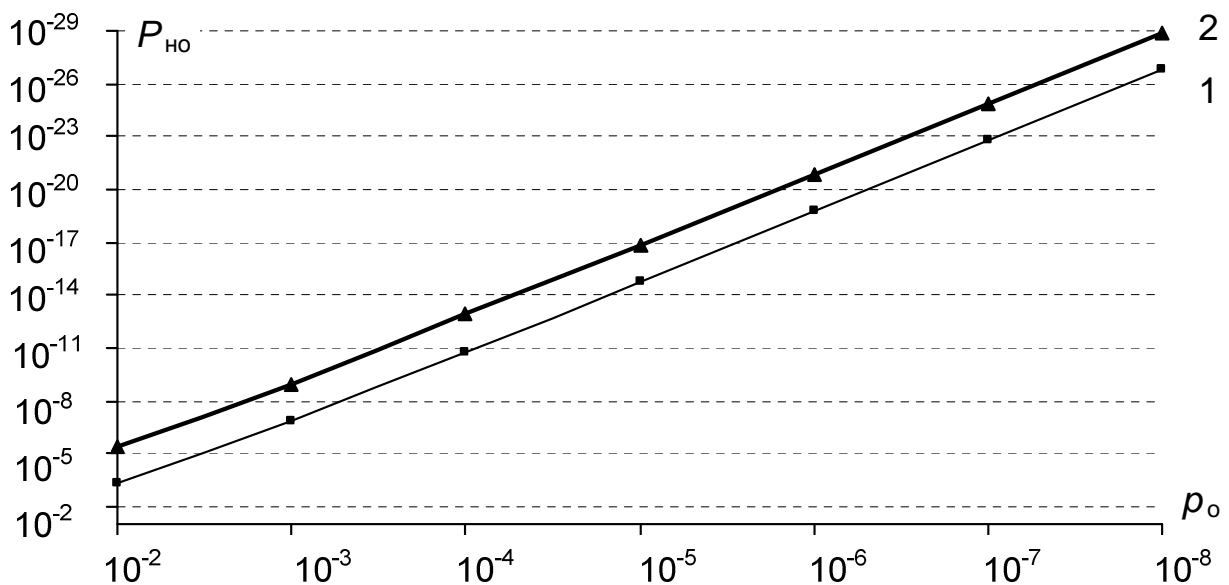


Рисунок 8 – Ймовірності невиявлення помилок  $P_{но}$  в простішому ітеративному коді (1) та в ітеративному коді на перестановках (2)



У додатках наведено тексти програм, що використовуються для імітаційного моделювання розроблених у роботі методів, патентне свідоцтво за результатами проведених розробок та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення достовірності передачі інформації в цифрових системах за допомогою методів виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках, що використовують факторіальні системи числення. При вирішенні цього завдання отримані наступні результати:

1. Запропоновано метод виявлення помилок в двійково-кодованих перестановках на основі послідовного порівняння їх елементів між собою. За рахунок високої глибини контролю помилок і швидкого перезапиту інформації даний метод дозволяє підвищити достовірність і швидкість передачі даних.

2. Запропоновано метод виявлення помилок в двійково-кодованих перестановках на основі контролю парності і кількості одиниць в їх стовпцях. Метод збільшує ймовірність виявлення помилок при передачі двійково-кодованих перестановок в асиметричних каналах зв'язку.

3. Запропоновано метод виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках на основі підсумовування їх двійкових елементів. Завдяки використанню додаткового кодування елементів двійково-кодованих перестановок, даний метод збільшує кількість виявлених помилок у двійково-кодованих перестановках і виправляє пакети помилок.

4. Проведено імітаційне моделювання запропонованих методів виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках. Зроблено оцінку інформаційної надмірності, швидкодії та достовірності передачі інформації на основі двійково-кодованих перестановок. Показано, що ймовірність виявлення помилок і швидкість передачі інформації із зростанням довжини двійково-кодованих перестановок прямує до максимуму.

5. Удосконалено метод побудови і нумерації двійково-кодованих перестановок сортуванням їх елементів, що дозволило зменшити число операцій порівняння, необхідних для перетворення факторіального числа в перестановку і зворотно. Використання для запису і зчитування даних спеціального доповнюючого масиву при перетворенні факторіального числа в перестановку і зворотно дозволило додатково скоротити кількість операцій перетворення.

6. На основі отриманих методів виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках, а також методів перетворення двійкових чисел в перестановки і зворотно проведений синтез структур відповідних пристроїв.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджені в НВП „Преобразователь” і в навчальному процесі на кафедрі електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Борисенко О.А. Електронна система генерації перестановок на базі факторіальних чисел / О.А. Борисенко, І.А. Кулик, О.Є. Горячев // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2007. – № 1. – С. 183 – 188 (входить до міжнародних наукометричних баз: INSPEC, РИНЦ).
2. Горячев А.Е. Построение факториальных чисел на основе двоичных счётчиков / А.Е. Горячев // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2008. – № 4. – С. 16 – 23 (входить до міжнародних наукометричних баз: INSPEC, РИНЦ).
3. Горячев А.Е. Преобразование двоичных и факториальных чисел с помощью счётных устройств / А.Е. Горячев // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2009. – № 148. – С. 14 – 19.
4. Горячев А.Е. Электронное устройство получения факториальных чисел / А.Е. Горячев // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2009. – № 2. – С. 169 – 174 (входить до міжнародних наукометричних баз: INSPEC, РИНЦ).
5. Горячев А.Е. Обнаружение ошибок в перестановках / А.Е. Горячев // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2009. – № 3. – С. 169 – 174 (входить до міжнародних наукометричних баз: INSPEC, РИНЦ).
6. Горячев А.Е. Оценка быстродействия алгоритмов генерации перестановок на основе факториальных чисел / А.Е. Горячев // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2010. – № 1. – С. 62 – 67 (входить до міжнародних наукометричних баз: INSPEC, РИНЦ).
7. Горячев А.Е. Метод генерации перестановок на основе факториальных чисел с использованием дополняющего массива / А.Е. Горячев, С.А. Дегтяр // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – №4. – С. 86 – 93 (входить до міжнародних наукометричних баз: INSPEC, РИНЦ).
8. Борисенко А.А. Методы обнаружения ошибок в перестановках / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №2(43). – С. 117 – 120.
9. Борисенко А.А. Анализ помехозащищенности кодов на перестановках / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев, С.А. Дегтяр // Системи обробки інформації. – 2013. – №3 (110). – С. 2 – 5.
10. Борисенко А.А. Исправление ошибок в перестановках / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев // Системи обробки інформації. – 2013. – №2 (109). – С. 171 – 173.
11. Борисенко А.А. Обнаружение ошибок на основе перестановок / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – №3. – С. 14 – 19.
12. Generation of Permutations Based Upon Factorial Numbers / А.А. Borisenko, V.V. Kalashnikov , І.А. Kulik ,А.Е. Goryachev // Intelligent Systems Design and Appli-

cations: Eighth International Conference, 26-28 November 2008, Kaohiung, Taiwan. – Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 2008. – P. 57 – 61.

13. Горячев А.Е. Метод генерации перестановок на основе факториальных чисел / А.Е. Горячев // Радиоелектроніка та молодь у ХХІ столітті: матеріали 12-го міжнародного молодіжного форуму, 1-3 квітня 2008, Харків. – Харків: ХНУРЕ, 2008. – С. 241.

14. Борисенко О.А. Завадостійка передача даних на базі факториальних чисел / О.А. Борисенко, О.Є. Горячев // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: матеріали 2-ї науково-практичної конференції, 22-24 квітня 2009, Вінниця. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – С. 21 – 22.

15. Борисенко О.А. Отримання перестановок на базі факториальних систем числення / О.А. Борисенко, О.Є. Горячев // Питання оптимізації обчислень (ПОО–ХХХV): збірка праць міжнародного симпозіуму, 24-29 вересня 2009, Київ. – Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2009. – С. 83 – 87.

16. Горячев А.Е. Устройство генерации факториальных чисел / А.Е. Горячев, С.В. Костель // ИНФОТЕХ – 2009: материалы международной научно-практической конференции, 7-12 сентября 2009, Севастополь. – Севастополь: СевНТУ. 2009. – С. 13 – 14.

17. Борисенко А.А. Получение факториальных чисел на основе счётчиков / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев, П.А. Никитенко // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції, 24 квітня 2009, Київ. – Київ: КПІ, 2009. – С. 14 – 15.

18. Борисенко А.А. Обнаружение ошибок в перестановках на основе сравнения их элементов / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев, А.А. Каренцев // Информационные процессы и технологии «Информатика 2010»: материалы 3-й международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, 26-30 апреля 2010, Севастополь. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – С. 285 – 287.

19. Борисенко А.А. Обнаружение и исправление ошибок в перестановках / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев, Е.Л. Онанченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 19-21 травня 2010, Вінниця. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – С. 348 – 349.

20. Горячев А.Е. Метод преобразования двоичных кодов в перестановки на основе факториальной системы счисления / А.Е. Горячев, Чередниченко К.В., Лапин А.С. // Радиоелектроніка та молодь у ХХІ столітті: матеріали 16-го міжнародного молодіжного форуму, 17-19 квітня 2012, Харків. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – С. 72 – 73.

21. Borisenko A.A. Permutation generation and numeration based on factorial numbers in computer systems / A.A. Borisenko, A.E. Goryachev, V.V. Siriachenko // Computer Algebra and Information Technology: book of abstracts of international conference, 20-26 august 2012, Odessa. – Odessa: TES, 2012. – P. 13 – 14.

22. Борисенко А.А. Применение перестановок в телекоммуникационных системах / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной конференции, 10-14 сентября 2012, Севастополь. Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 336 – 337.

23. Борисенко А.А. Помехоустойчивая передача информации на перестановках / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 3-8 червня 2013, Одеса. – Хмельницький: ХНУ 2013. – С. 188.

24. Пат. на корисну модель 59628 Україна, МПК (2011.01) G06F 17/00. Пристрій для перебору перестановок / О.А. Борисенко, О. Є. Горячев; заявн. Сумський державний університет. – № u201012855; заявл. 29.10.2010; опубл. 25.05.2011; Бюл. №10.

25. Борисенко А.А. Помехоустойчивая передача экономической информации на основе перестановок / А.А. Борисенко, А.Е. Горячев // Актуальні проблеми економіки. – 2013. – №3(141). – С. 156 – 163 (входить до міжнародних наукометричних баз: Scopus, Index Copernicus, EBSCO, Ulrich's).

## АНОТАЦІЯ

**Горячев О.Є. Методи підвищення достовірності передачі інформації в цифрових системах на основі двійково-кодованих перестановок. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2014.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню достовірності передачі даних в цифрових системах шляхом використання двійково-кодованих перестановок. Зроблена оцінка ефективності використання двійково-кодованих перестановок для завадостійкого кодування інформації, що передається. Розроблено методи виявлення та виправлення помилок в двійково-кодованих перестановках на основі контрольних сум, порівняння елементів двійково-кодованих перестановок та за кількістю одиниць в їх стовпцях. Досліджена залежність глибини контролю помилок запропонованих методів від довжини двійково-кодованих перестановок. Розроблений метод побудови і нумерації двійково-кодованих перестановок на основі факторіальної системи числення. Для цього методу зроблено оцінку швидкодії перетворення інформації в двійково-кодовані перестановки і зворотно. Запропоновано удосконалення, що дозволяють прискорити процеси побудови і нумерації двійково-кодованих перестановок за рахунок зменшення кількості операцій, необхідних для перетворення факторіальних чисел в перестановки і зворотного перетворення. Розглянуто структуру пристроїв, що реалізують розроблені в роботі методи. Для отримання двійково-кодованих перестановок в них використовуються факторіальні лічильники. Результати досліджень підтвердили високу ефективність запропонованих методів, особливо при великих значеннях довжин двійково-кодованих перестановок.

Ключові слова: цифрові системи, перестановки, факторіальна система числення, ітеративний код, завадостійкість передачі даних.

## АННОТАЦИЯ

**Горячев А.Е. Методы повышения достоверности передачи информации в цифровых системах на основе двоично-кодированных перестановок. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена повышению достоверности передачи информации в цифровых системах за счёт применения помехоустойчивого кода на двоично-кодированных перестановках. Проведен анализ существующих методов повышения достоверности передаваемой информации и построения двоично-кодированных перестановок. Сделан вывод, что для решения задачи кодирования и декодирования передаваемой информации двоично-кодированными перестановками большой длины необходимо применять факториальные числа в виде промежуточного шага перехода от исходной двоичной информации к двоично-кодированным перестановкам и обратно. Предложена структура цифровой системы, в которой для обеспечения достоверности передачи информации используются двоично-кодированные перестановки. Произведена оценка эффективности использования двоично-кодированных перестановок для помехоустойчивого кодирования информации. Получены выражения для скорости передачи информации, значений избыточности сообщений, доли обнаруживаемых ошибок и вероятности необнаружения ошибок в двоично-кодированных перестановках. Рассмотрены свойства двоично-кодированных перестановок, позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки и на их основе разработаны различные методы обнаружения и исправления ошибок. Первый из них – это метод сравнения элементов двоично-кодированных перестановок между собой с повышенной глубиной контроля ошибок и ускоренным переспросом информации. Второй – метод обнаружения ошибок в двоично-кодированных перестановках на основе подсчета числа единиц в их столбцах, повышающий вероятность обнаружения ошибок в асимметричных каналах связи. Третий – метод обнаружения и исправления ошибок в двоично-кодированных перестановках на основе суммирования их двоичных элементов, позволяющий исправлять пакеты ошибок. Исследованы зависимости глубины контроля ошибок предложенных методов от длины перестановок. Результаты исследований подтвердили высокую эффективность предложенных методов при больших значениях длины двоично-кодированных перестановок.

Разработан метод построения и нумерации двоично-кодированных перестановок на основе факториальной системы счисления, включающий в себя алгоритмы преобразования двоичных чисел в факториальные числа, преобразования факториальных чисел в двоично-кодированные перестановки и обратного преобразования этих перестановок в факториальные числа и факториальных чисел в двоичные числа. Произведена оценка быстродействия этого метода. Предложена сортировка элементов двоично-кодированных перестановок, уменьшившая количества

операций, необходимых для преобразования факториальных чисел в перестановки и обратно. Использование для записи и считывания сообщений специального дополняющего массива при преобразовании факториального числа в двоично-кодированную перестановку и обратно позволило дополнительно сократить количество операций преобразования. Предложен метод построения факториальных чисел путём деления на факториалы в возрастающем порядке. Получены выражения, позволяющие оценить быстродействие построения факториальных чисел этим методом в зависимости от длины перестановок. Рассмотрена структура устройств, реализующих предложенные в работе методы. Для получения перестановок в них используются факториальные счётчики.

Результаты диссертационной получили внедрение в НПП "Преобразователь" при разработке системы сбора, хранения, обработки и передачи данных в автоматизированной системе управления технологическим процессом распределения электроэнергии в электрических сетях, а также в Сумском государственном университете в учебном процессе кафедры электроники и компьютерной техники.

**Ключевые слова:** цифровые системы, перестановки, факториальная система счисления, итеративный код, помехоустойчивость передачи данных.

## ABSTRACT

**Goryachev A.E. Methods for improving noise immunity of digital systems on the basis of binary coded permutations. – Manuscript.**

Thesis for Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – computer systems and components. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry for Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2014.

The thesis is dedicated to providing immunity of digital systems through using of binary-coded permutations. The effectiveness of the use of permutations for error-correcting coding of information is evaluated. Expressions for the values of redundancy and the proportion of detected errors in the permutations are obtained. A number of methods for detecting and correcting errors in permutations are developed. Correction ability of the proposed methods as a function of the permutations length and communication channel parameters is investigated. The models of coding and decoding of information based on the factorial number system are developed. Using these models, the encoding and decoding speed is evaluated. Based on this assessment it is concluded that improvement of these methods in order to increase performance is needed. Methods which allow accelerating the process of encoding and decoding by reducing the number of operations of transformation factorial numbers into the permutation are proposed. The structure of devices that implement the methods proposed in the paper, are considered. To obtain permutations they use factorial counters. Research results have confirmed the high noise immunity of the proposed methods.

**Keywords:** digital systems, permutations, factorial notation, iterative code, noise immunity.