

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.01.10
УДК 519.2

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

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

В. О. ШАРОВ, аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e mail: wycrpiy@gmail.com; ORCID: 0000-0003-3152-0650

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КОДЕРІВ ЗАВАДОСТІЙКИХ КАСКАДНИХ КОДІВ ДЛЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Для різних каналів передачі інформації, що можуть використовуватись у локальних системах управління широкого спектру процесів, необхідні доступні, здатні до масштабування й не витратні методи передачі, що дозволяють передавати необхідну інформацію достовірно без помилок. Помилки, що трапляються у дискретних безперервних каналах зв'язку – це основна перепона для достовірної передачі даних. Основні причини виникнення помилок – загасання сигналу, шум та різні перешкоди. Як результат аналізу статистики помилок у дискретних каналах передачі даних, було зроблено висновок, що однократні та двократні помилки трапляються у абсолютній більшості випадків. Запропоновано боротись із помилками шляхом використання завадостійкого кодування. Серед завадостійких кодів виділені надлишкові блокові роздільні систематичні коди, до яких відноситься код Хеммінга. В основу моделі завадостійкого кодування запропоновано покласти використання систематичного коду Хеммінга з подальшим каскадним кодуванням шляхом додавання біту перевірки на парність. Використана модель надала можливість боротись з усіма найбільш ймовірними випадками виникнення помилок. Оскільки дана модель кодування повинна гнучко використовуватись в різних системах, необхідним критерієм моделі є її універсальність. Тому виконане тестування моделі на вибірці з кодовими комбінаціями різної кількості бітів. Метою даної статті є аналіз залежності часу виконання процедури кодування для кодерів різного рівня: окремого кодера першого ступеню, а також кодера першого ступеню з додаванням кодера другого ступеню. Проведено експерименти з великою вибіркою, які були у подальшому проаналізовані та інтерпретовані. Оскільки модель у результаті експериментів виявила себе гнучкою, простою, стабільною та ефективною, а також процес боротьби із завадами шляхом використання каскадних кодів добре себе зарекомендував у світовій практиці, модель рекомендовано для використання у різних інформаційних управляючих системах. Наведена реалізація кодера для завадостійкої передачі даних.

Ключові слова: завадостійкість, біт, код, кодова комбінація, каскадні коди, кодування, кодер, перевірка на парність.

Вступ. У сучасних комунікаційних технологіях широко розповсюджені стандартні принципи передачі даних. Спочатку на одному пристрої інформація генерується, потім вона кодується, передається по каналах, декодується і використовується споживачем вже на іншому пристрої.

Завадостійка передача даних дуже важлива для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами [1]. Це особливо необхідно для надійного функціонування інформаційних управляючих систем в ядерній енергетиці [2]. Моделі завадостійких кодів повинні бути враховані при вдосконаленні інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами [3].

У сучасній теорії передачі даних існує низка способів для покращення якості даних, збільшення достовірності та зменшення експлуатаційних витрат [4]. Тому ідея створення нових моделей кодування, а також покращення вже існуючих моделей є концептуальною однією з найважливіших.

У теперішній час ведуться активні розробки по створенню нових засобів забезпечення завадостійкості у каналах передачі даних з широким впровадженням та практичним використанням [4]. Ще з часів Клоду Шеннону та його праці «Математична теорія зв'язку» 1948 року концепція завадостійкого каналу передачі даних була однією з найбільш цікавою для досліджень, що дозволяли економити багато ресурсів та знижувати

собівартість інформаційних систем [1]. Оскільки з тих часів інформаційних систем і технологій стало набагато більше, то і дослідження за даним напрямом стали складнішими. Сучасні дослідники передачі даних, серед яких такі вчені як Фаді Аладжі, Тіме Ніколас, Альфорд Веслі, Бенджамін Флекер, Джон М. Бегс та інші, генерували нові ідеї в теорії інформації, пропонували нові підходи та вдосконалили попередні технології [5, 6]. На основі сучасної теорії та практики кодування актуальною є задача вдосконалення існуючих моделей і алгоритмів кодування, їх дослідження в сучасних інформаційних системах.

Мета та задачі дослідження. Мета даної статті полягає в розробці моделі завадостійкої передачі даних для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами шляхом аналізу можливостей кодерів завадостійких каскадних кодів.

Для цього поставлені задачі:

- 1) обрати завадостійкий код для моделі;
- 2) реалізувати модель на мові програмування;
- 3) провести експерименти з кодування;
- 4) проаналізувати результати експериментів.

Завадостійкі коди. Під завадостійкими кодами розуміють коди, що дозволяють виявляти або виправляти та виправляти помилки, які виникають у результаті впливу завад. Здатність коду до виявлення та виправлення помилок базується на введенні надмірності в кодову інформаційну комбінацію. Надмірні символи

© Нікуліна О. М., Северин В. П., Шаров В. О., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПИ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПИ" 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.



формується за певними правилами і називаються перевірочними або контрольними. Збільшення числа таких символів в кодовій комбінації підвищує виявляючу і виправляючу здатності коду, але призводить до зниження швидкості передачі інформації.

Надлишковість коду розділяється на абсолютну та відносну. Абсолютна надлишковість визначається кількістю додаткових розрядів, які вводяться,

$$k = n - m, \quad (1)$$

де k – абсолютна надлишковість або кількість перевірочних елементів;

n – загальна кількість елементів у кодовій комбінації, довжина кодової комбінації;

m – загальна кількість інформаційних елементів у кодовій комбінації.

Властивості коригування надлишкових кодів є залежними від кодування або побудови самих кодів та їх параметрів: числа розрядів, надмірності, тривалості символів й інших. Розглянуті загальні принципи використання надлишковості.

Нехай на вхід кодуємого пристрою надійшла деяка послідовність m інформаційних двійковий розрядів. На виході їй буде відповідати послідовність з n двійкових символів, де $n > m$. Усього може бути 2^m різних послідовностей з 2^n , які є дозволеними кодівими комбінаціями. Інші $2^n - 2^m$ з можливих вихідних послідовностей для передачі не використовуються, тому вони називаються забороненими [5, 6, 7].

Існує велика кількість завадостійких кодів. На рис. 1 наведена часткова ієрархія видів завадостійких кодів [5].



Рис. 1. Види завадостійких кодів

Ураховуючи та аналізуючи усі переваги та недоліки різних видів кодів, розглянуті завадостійкі коди Хеммінґа, які є надлишковими блоковими роздільними систематичними кодами.

Коди Хеммінґа. Коди Хеммінґа надають можливість гарантовано виправляти одноразові помилки. Досліджується використання кодів Хеммінґа з додаванням до них біту перевірки на парність, що дозволяє

виправляти одноразові помилки та виявляти дворазові помилки.

Коди Хеммінґа формуються стандартним для систематичних кодів матричним способом. Перевірочна матриця $H_{(n-m) \times n}$ формується з одиничної матриці O_{n-m} та транспонованої перевірочної підматриці $P_{m \times (n-m)}^T$ і має вигляд

$$H_{(n-m) \times n} = (O_{n-m} | P_{m \times (n-m)}^T). \quad (2)$$

Коди Хеммінґа є одними з найпростіших представників блокових систематичних кодів. Принцип їх формування аналогічний загальному принципу побудови систематичних кодів. Основною ідеєю кодів Хеммінґа є чітке використання певних розрядів у комбінації, задля досягнення можливості виправляти однократну помилку [7].

Довжина коду n вибирається з умови

$$2^m \leq \frac{2^n}{1+n}, \quad (3)$$

що означає виконання умови

$$2^k < m + k + 1. \quad (4)$$

Код будується таким чином, щоб в результаті $p = n - k$ перевірок отримати p -розрядне двійкове число, що вказує номер спотвореної позиції в кодовій комбінації. Для цього перевірочні символи повинні перебувати на тих номерах позицій, які відповідають ступеням двійки $2^0, 2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^{k-1}$. Кожен з перевірочних символів входить тільки в одне з перевірочних рівнянь. Таким чином, якщо нумерувати позиції зліва направо, то контрольні символи повинні знаходитися на першій, другій, четвертій і т. д. позиціях.

Результат першої перевірки дає цифру молодшого розряду синдрому, тобто номеру спотвореного біту, в двійковому записі. Якщо в результаті цієї перевірки отримано значення 1, то один із символів перевіреної групи спотворений. Таким чином, першою перевіркою повинні бути охоплені символи з номерами, що містять в двійковій формі запису одиниці в першому розряді: 1, 3, 5, 7, 9 і т. д.

Результат другої перевірки дає цифру другого розряду синдрому. Отже, другою перевіркою повинні бути охоплені символи з номерами, що містять в двійковій формі запису одиниці в другому розряді: 2, 3, 6, 7, 10 і т. д.

Аналогічно, при третій перевірці повинні перевірятися символи, номери яких в двійковій формі запису містять одиниці в третьому розряді: 4, 5, 6, 7, 12 і так далі [6].

Принцип розташування розрядів для кодової комбінації Хеммінґа 7/4 наведено в табл. 1 [8].

У табл. 1 використані позначення:

№ – номер розряду у комбінації;

F – вказує на місця розрядів за призначенням;

I_i – інформаційні розряди;

K_i – перевірочні розряди;

S_i – розряди, за які відповідає при перевірці i -й перевірочний розряд.

X – розряди, які підсумовуються за модулем 2.

Таблиця 1 – Розташування розрядів коду Хеммінга 7/4

№	1	2	3	4	5	6	7
F	K_1	K_2	I_1	K_3	I_2	I_3	I_4
S_3				X	X	X	X
S_2		X	X			X	X
S_1	X		X		X		X

Таким чином, перевірочні групи повинні мати вигляд:

$$S_4 = k_8 \oplus k_9 \oplus k_{10} \oplus k_{11} \oplus k_{12} \oplus \dots$$

$$S_3 = k_4 \oplus k_5 \oplus k_6 \oplus k_7 \oplus k_{12} \oplus \dots$$

$$S_2 = k_2 \oplus k_3 \oplus k_6 \oplus k_7 \oplus k_{10} \oplus \dots$$

$$S_1 = k_1 \oplus k_3 \oplus k_5 \oplus k_7 \oplus k_9 \oplus \dots$$

де \oplus – підсумовування за модулем 2.

При додаванні до коду Хеммінга біту перевірки на парність проходить перевірка на парність усієї кодової послідовності, тобто формується каскадний код [9].

Каскадні коди. Каскадний код, або турбо-код – паралельний, блоковий, систематичний код, який здатен виправляти помилки, що виникають при передачі цифрової інформації каналом зв'язку з шумами. В основному, каскадні коди складаються з двох або більше, менших за розміром і простіших кодів. Основна ідея каскадного коду полягає у тому, що повідомлення одноразово кодується у кодері 1, потім це закодоване повідомлення кодується поверх кодером 2 і так далі. При декодуванні процес декодування виконується у зворотному порядку.

Можливість провести процес декодування повторно робить каскадні коди дуже зручними. Однією з ідей також є те, що другий декодер зберігає у собі адреси помилок, які zostалися від першого декодера, а при зверненні до першого декодера, у ньому зберігаються адреси помилок другого, тобто ці декодери пов'язані й збірні. Загальна схема каскадних кодів зображена на рис. 2 [8].

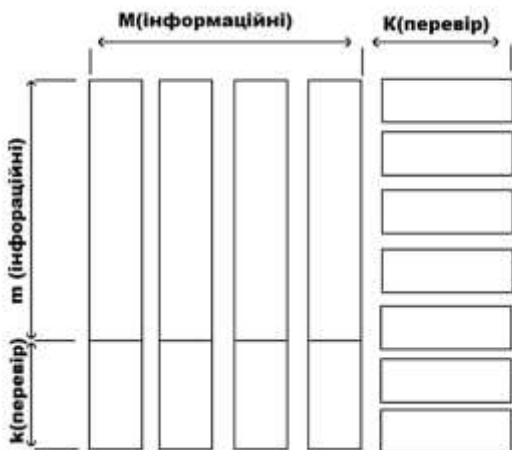


Рис. 2. Загальна схема каскадного коду

Загальна схема кодування та декодування каскадним кодом з додаванням біту перевірки на парність наведена на рис. 3 [9, 10].

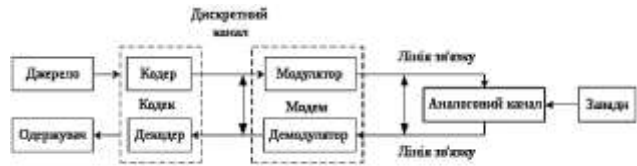


Рис. 3. Загальна схема кодування та декодування

У даній статті розглядається перший етап передачі інформації, а саме кодування кодом першого ступеню, після чого виконується кодування кодом другого ступеню. Загальна схема кодування каскадним кодом показана на рис. 4 [11, 12].



Рис. 4. Загальна схема кодування каскадним кодом

Принцип розташування розрядів для кодової комбінації Хеммінга 8/4 надано в табл. 2.

Таблиця 2 – Розташування розрядів коду Хеммінга 8/4

№	1	2	3	4	5	6	7	8
F	K_1	K_2	I_1	K_3	I_2	I_3	I_4	K_n
S_4	X	X	X	X	X	X	X	X
S_3				X	X	X	X	
S_2		X	X			X	X	
S_1	X		X		X		X	

У табл. 2 використано позначення K_n – місце розташування біту перевірки на парність.

Для коду Хеммінга додавання біту перевірки на парність означає, що після кодування кодом першого ступеню проходить підсумовування за модулем 2 для усіх елементів комбінації [13, 14]. Потім результат такого підсумовування записується у біт перевірки на парність, «закриваючи» байт.

Для комбінацій з більшою довжиною повідомлення принцип такий самий, як і в табл. 2. Оскільки при кодуванні кодом Хеммінга при будь-якій довжині інформаційного повідомлення завжди залишається один незайнятий біт, тому його доцільно використати для перевірки на парність [15].

Аналіз моделей кодерів коду Хеммінга. Кодування інформаційної комбінації кодом Хеммінга без додавання біту перевірки на парність займає менше часу, ніж кодування кодом Хеммінга з додаванням біту перевірки на парність.

Дослідження цієї різниці виконано з використанням різного програмного забезпечення. У даній статті використовується мова програмування Java (language version 8 або вище) без використання сторонніх фреймворків.

При дослідженні часу виконання програми кодера виявлені наступні закономірності. На рис. 4. наведено залежність часу кодування комбінацій кодом Хеммінга без перевірки на парність від кількості символів

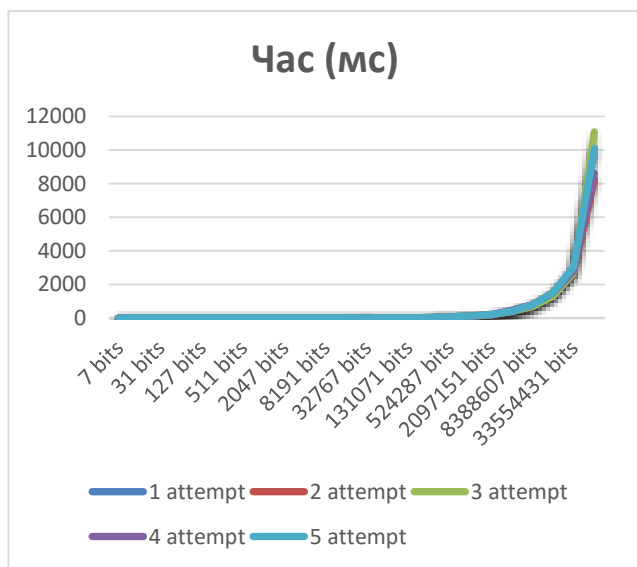


Рис. 4. Час кодування без перевірки на парність

Для полегшення роботи з вибіркою даних за основу початкової комбінації обирались біти, близькі до повних байтів, кількість яких подвоювалась кожного разу.

Необхідно відмітити, що до 8 388 607 бітів, що являється еквівалентом 2 097 152 байт, швидкість кодування кодером першого ступеню не перевищувала 3 секунд, для меншої кількості бітів час кодування був незначним, а для комбінацій до 8192 бітів швидкість була майже миттєвою.

На рис. 5 наведено час кодування комбінацій кодом Хеммінга з перевіркою на парність комбінацій залежно від кількості символів.

Схожі результати демонструє кодування кодом першого ступеню з додаванням до нього коду другого ступеню, а саме додавання біту перевірки на парність.

Додавання такого біту дозволяє повністю вмістити бітові комбінації у байти без пропусків. Це є ще однією перевагою моделі, бо навіть з додаванням біту перевірки на парність, кінцева кількість байтів не змінюється, що надає переваги над іншими каскадними кодами.

На рис. 6. наведено час кодування комбінацій кодом Хеммінга без перевірки на парність та з перевіркою на парність залежно від кількості символів.

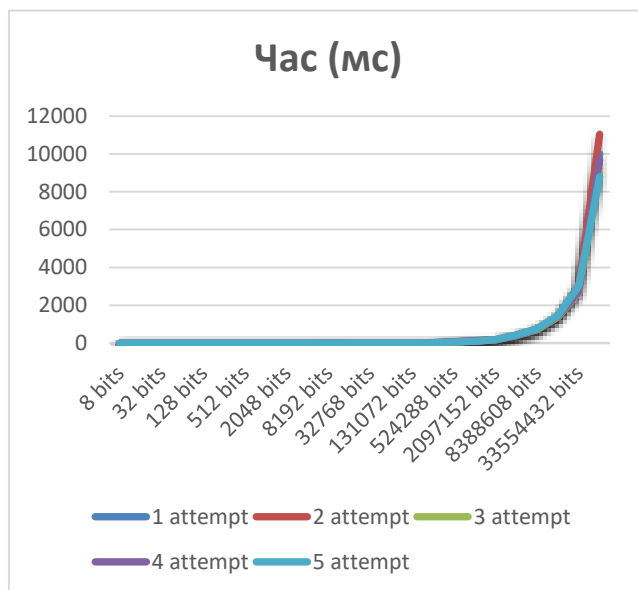


Рис. 5. Час кодування з перевіркою на парність

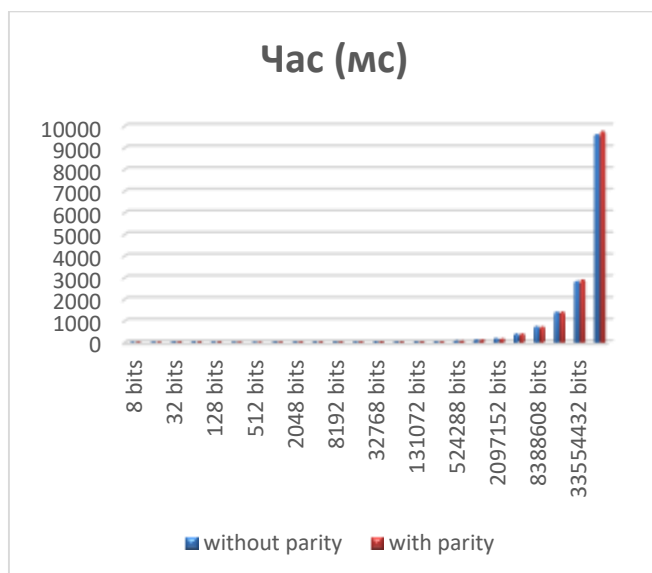


Рис. 6. Час кодування без перевірки та з перевіркою на парність

Аналіз результатів кодування. Аналіз отриманих результатів показує, що час виконання процедури кодування збільшується у геометричній прогресії відносно кількості елементів кодування.

Різне зростання часу обробки також може бути пов'язане з тим, що на кодуєчому пристрої, у якості якого використовувався ноутбук ASUS TUF F15, в якого наявні 8 Гб оперативної пам'яті, закінчилась вільна оперативна пам'ять, тому у повному обсязі про нелінійне зростання часу виконання процедури кодування висновки робити зарано. Для більшої надійності, необхідне тестування на більш потужних кодуєчих пристроях.

Порівнюючи час кодування без додавання біту перевірки на парність та з додаванням біту перевірки

на парність, стає очевидним, що час, який використовується для додавання біту перевірки на парність, не є значним.

Перевага додавання біту перевірки на парність у вигляді виявлення дворазових помилок є значною, бо без суттєвого ускладнення системи і без зміни розміру повідомлень, додавання біту перевірки на парність надає змогу боротись з основною кількістю ймовірних помилкових ситуацій.

Висновки. В результаті аналізу і дослідження наукових праць різних авторів, опираючись на сучасну теорію передачі інформації, у статті проводився аналіз моделі каскадного коду. Проаналізована ефективність кодування звичайного коду Хеммінга та каскадного коду Хеммінга з додаванням до нього біту перевірки на парність. Експериментально визначений час кодування для наведених кодів. У результаті співставлення експериментальних даних з'ясовано, що вплив додавання біту перевірки на парність є незначним. Для комбінацій невеликої довжини додатковий час не перевищує 7% від загального часу при додаванні біту перевірки на парність, що дозволяє економити час при передачі, а тому й збільшувати пропускну здатність. Необхідно відмітити, що додавання біту перевірки на парність не потребує додавання додаткових байтів при передачі у складі пакетів даних. Це не збільшує довжину пакету з даними, а тому не ускладнює протоколи передачі даних мережевого рівня. Тому каскадний код Хеммінга надає можливість працювати з усіма протоколами, які використовуються при передачі даних у всіх світових каналах, без змін.

Список використаної літератури

1. Нікуліна О. М., Северин В. П., Шаров В. О. Розробка моделі завадостійкої передачі даних для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології.* Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 2 (8). С. 57–62.
2. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба 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.
3. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба 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.
4. Захарченко Н. В., Горохов С. М., Кочетков А. В. *Інформаційні параметри позиційних кодів.* Одеса: ОНАС, 2018. 212 с.
5. Eklund J. E., Arvidsson R. A multiple sampling, single A/D conversion technique for I/Q demodulation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits.* 1996, vol. 31, iss. 12, p. 1987–1994.
6. Blahut R. *Theory and Practice of Error Control Codes.* Addison-Wesley, 1983. 500 с.
7. Лосев Ю. І., Шматков С. І. *Основи теорії передачі інформації.* Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2013. 290 с.
8. Yue Tang, Tian Mao, Bing Jiang, Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna. *Journal of Radars.* 2016. Vol. 5, iss. 3. P. 265–270.
9. Банкет В. Л., Івашенко П. В., Іщенко М. О. *Завадостійке кодування в телекомунікаційних системах.* Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. 100 с.

10. Жураковський Ю. П., Полторак В. П. *Теорія інформації та кодування.* Київ: Вища шк., 2001. 255 с.
11. Кожевников В. Л., Кожевников В. Л. *Теорія інформації та кодування.* Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011. 108 с.
12. Jones G. A., Jones J. M. *Information and Coding Theory.* London: Springer, 2000. 210 p.
13. 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.
14. 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. P. 3153–3160.

References (transliterated)

1. Nikulina O. M., Severyn V. P., Sharov V. O. Rozrobka modeli zavadostykoji peredachi danyh dlja informatsiynoi tekhnologii optimizatsii upravlinnja dynamichnymy sistemamy [Development of a data transfer model for information technology optimization of dynamic systems control]. *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., 2022, no.2 (8), pp. 57–62.
2. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V., Bubnov A. I. Modeluvannya teplovykh procesiv parogeneratora AES dlya informatsiynoi tekhnologii optimizatsii 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]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1 (5), pp. 56–61.
3. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Rozrobka informatsiynoi tekhnologii optimizatsii upravlinnja skladnymy dynamichnymy sistemamy [Development of information technology for optimizing the 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.
4. Zakharchenko N. V., Gorokhov S. M., Kochetkov A. V. *Informatsijni parametry pozitsijnyh kodiv* [Information parameters of positional codes]. Odesa, ONAS Publ., 2018. 212 p.
5. Eklund J. E., Arvidsson R. A multiple sampling, single A/D conversion technique for I/Q demodulation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits.* 1996, vol. 31, iss. 12, pp. 1987–1994.
6. Blahut R. *Theory and Practice of Error Control Codes.* Addison-Wesley, 1983. 500 p.
7. 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.
8. Yue Tang, Tian Mao, Bing Jiang Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna. *Journal of Radars.* 2016, vol. 5, iss. 3, p. 265–270.
9. Banket V. L., Ivashchenko P. V., Ishchenko M. O. *Zavadostijke koduvannja v telekomunatsijnyh sistemah* [Interference-resistant coding in telecommunication systems]. Odesa, ONAZ named O. S. Popova Publ., 2011. 100 p.
10. Zhurakovsky Yu. P., Poltorak V. P. *Teorija informatsiji ta koduvannja* [Theory of information and coding]. Kyiv, Vyshcha shk. Publ., 2001. 255 p.
11. Kozhevnikov V. L., Kozhevnikov V. L. *Teorija informatsiji ta koduvannja* [Theory of information and coding]. Dnipropetrovsk, National Mining University Publ., 2011. 108 p.
12. Jones G. A., Jones J. M. *Information and Coding Theory.* London, Springer, 2000. 223 p.

13. Sharov V. O., Berdnikov A. G. Modeluvannja 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"* [Materials of the international scientific and technical conference "Computer modeling in knowledge-intensive technologies"]. Kharkiv, KhNU named V. N. Karazina Publ., 2021, pp. 298–302.
14. 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, pp. 3153–3160.

Надійшла (received) 10.05.2023

UDC 519.2

O. M. NIKULINA, 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

V. P. SEVERYN, 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

V. O. SHAROV, 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: wycptiy@gmail.com

SIMULATION AND ANALYSIS OF ENCODERS OF INTERFERENCE-RESISTANT CASCADE CODES FOR DYNAMIC SYSTEMS

For various channels of information transmission that can be used in local control systems of a wide range of processes, affordable, scalable, and inexpensive transmission methods are needed that allow the necessary information to be transmitted reliably without errors. Errors that occur in discrete, continuous communication channels are the main obstacle to the reliability of transmitted data. The main causes of errors are signal attenuation, noise and various interferences. As a result of the analysis of error statistics in discrete data transmission channels, it was concluded that single and double errors occur in the absolute majority of cases. It is proposed to combat errors by using tamper-resistant coding. Among the interference-resistant codes, redundant block-separated systematic codes are highlighted, among which is the Hamming code. The basis of the interference-resistant coding model is proposed to be the use of a systematic Hamming code followed by cascade coding by adding a parity check bit. The used model made it possible to deal with all the most likely cases of errors. Since this coding model must be flexibly used in different systems, a necessary criterion of the model is its universality. Therefore, the model was tested on a sample with code combinations of different numbers of bits. The purpose of this article is to analyze the dependence of the coding procedure execution time for encoders of different levels: a separate first-stage encoder, as well as a first-stage encoder with the addition of a second-stage encoder. Experiments were conducted with a large sample, which were subsequently analyzed and interpreted. Since the model proved to be flexible, simple, stable and effective as a result of experiments, and the process of combating interference by using cascade codes has proven itself well in world practice, it is recommended for use in various information management systems. The implementation of the coder for interference-resistant data transmission is given.

Keywords: immunity, bit, code, code combination, cascade codes, coding, coder, parity check.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Нікуліна Олена Миколаївна, Nikulina Olena Mykolaivna

Автор 2 / Author 2: Северин Валерій Петрович, Severyn Valerii Petrovych

Автор 3 / Author 3: Шаров Владислав Олегович, Sharov Vladyslav Olegovych