Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. №3 (29)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

УДК 681.3
DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121

В. Ярещенко, В. Косенко

МЕТОД КОДУВАННЯ З НИЗЬКИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ У СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Об’єктом дослідження в статті є технологія *Network-on-Chip (NoC)*, яка стала популярним вибором для внутрішньокристалічної комунікаційної архітектури сучасних пристроїв *System-on-Chip (SoC)*. **Предмет дослідження** – методи зниження розсіюваної потужності в *NoC* і *SoC*. **Мета роботи**: розроблення методу кодування з низьким енергоспоживанням, що дає змогу ефективно передавати або зберігати інформацію. У статті розв’язуються такі **завдання**: аналіз методів класифікації комбінаторних структур, побудова системи типових представників класів еквівалентності та аналіз їх характеристик. **Методи дослідження** основані на використанні теорії множин, теорії систем і комбінаторики. **Досягнуті результати**. Проаналізовано фактори, що впливають на розсіювану потужність, і принципи побудови енергоефективних кодів. Показано, що комутаційна активність сприяє значній долі загальної потужності та методи кодування з низьким енергоспоживанням є ефективними для зниження комутаційної активності під час зв’язку між пристроями або зв’язку на кристалі. Розроблено метод ієрархічної класифікації кодів єдиного розташування та алгоритми розв’язання поетапних задач. В основі методу лежить інваріантний підхід і побудова системи різних представників. Отримано оцінки їх кількості, визначено характеристики, сформовано каталоги типових представників. **Висновки**. У статті проаналізовано фактори, що впливають на розсіювану потужність, розглянуто принципи побудови енергоефективних кодів. Розроблено метод ієрархічної класифікації кодів єдиного розташування та алгоритми розв’язання поетапних задач, сформовано каталоги типових представників. Застосування розробленого методу дасть змогу розробникам аналізувати й обирати коди з кращими властивостями та, зрештою, отримувати кращі результати щодо мережних затримок, витрат на електроенергію та інших конструктивних обмежень для комп’ютерних систем.

Ключові слова: кодування; коди одиничних відстаней; енергоефективне кодування; комутаційна активність; еквівалентність; класифікація; перерахування.

Вступ (визначення проблеми)

Завдяки масштабованості та високій продуктивності технологія *Network-on-Chip (NoC)* стала популярним вибором для комунікаційної архітектури сучасних пристроїв *System-on-Chip (SoC)*. Через зростання складності *SoC* споживання енергії стало серйозною проблемою в розробленні *NoC* [1].

Комутаційна активність шин є причиною значної частки загальної потужності, що розсіюється у сучасних пристроїв *SoC*. Основним джерелом розсіювання динамічної потужності в цифрових схемах є шини, які звичайно навантажені більшими ємностями вхідного й вихідного вузлів, а також ємності міжз’єднання. Ці ємності зростають залежно від розвитку технологій. З ускладненням *SoC* кількість шин також збільшується. Для зниження комутаційної активності під час зв’язку між пристроями або зв’язку на кристалі потрібні методи кодування з низьким енергоспоживанням [2, 3].

З огляду на сказане актуальною є проблема пошуку методів кодування з низьким енергоспоживанням, що дають змогу ефективно передавати або зберігати інформацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Чимало проблем теорії кодування можна описати в термінах комбінаторних об’єктів [4]. Ці проблеми потім можуть бути розв’язані з використанням теоретичних і обчислювальних методів. Теорія комбінаторного кодування відповідає зазначеним проблемам, описуючи код як кінцевий набір кодових слів, що містять символи кінцевого алфавіту [5]. Основним є математичний спосіб пошуку кодів, що мають певні комбінаторні властивості.

Математичне моделювання багатьох задач, що мають комбінаторну структуру, вимагає використання нових класів комбінаторних множин. Застосування класичних підходів до опису й генерації елементів комбінаторних множин у реальних завданнях призводить до громіздких результатів і вони не застосовні на практиці. Тому виникає необхідність розроблення конструктивних засобів опису класів комбінаторних множин, що мають необхідні властивості [6].

Процес виконання завдання побудови комбінаторних множин, що мають складну комбінаторну структуру, можна поділити на два етапи. Перший етап – опис

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. No. 3 (29)

і генерація елементів комбінаторної множини із заданими властивостями. Другий етап передбачає підрахунок усіх елементів комбінаторної множини й може бути виконаний методами комбінаторики [7].

Теорія перерахування комбінаторного аналізу здебільшого знаходить і досліджує формули для точного й асимптотичного підрахунку елементів у різних класах комбінаторних об’єктів. Розв’язання конкретної задачі перерахування дає змогу встановити специфічні комбінаторні властивості вихідних об’єктів, що виявляються в самій процедурі перерахування або випливають із досягнутих результатів [8].

Існують такі методи перерахування [8, 9]: безпосередніх підрахувань; рекурентних співвідношень; твірних функцій; асимптотичні методи; теорія перерахування Д. Пойа [10, 11]. Центральне місце серед зазначених методів посідає метод твірних функцій, описаний у роботах М. Клазар [12], Н. Камерон [13], Д. Вест [4]. Зазначений метод має розвинутий математичний апарат, зводить задачу перерахування до визначення кількості послідовностей, що мають або не мають деякі спеціальні властивості. У комбінаторному аналізі застосовуються твірні функції різного виду: твірні функції експонентного типу, ряди П. Діріхле, твірні функції Л. Ейлера тощо.

Теорія перерахування Д. Пойа, основана на роботах В. Бернсайда [14], Ф. Харарі [15], Д. Брейна [16], характеризується введенням відношень еквівалентності на множині об’єктів перерахування щодо заданої групи підстановок.

Розрізняють два основних типи задач перерахування: перерахування позначених об’єктів і об’єктів, нееквівалентних щодо заданої групи підстановок. Для об’єктів першого типу існує чимало різних методів, але вони не повністю уніфіковані. Для задач другого типу схема розв’язання полягає у зведенні задачі другого типу до рішення відповідної або модифікованої задачі першого типу [4, 13].

Застосування теорії Д. Пойа в розв’язанні конкретної задачі вимагає, щоб були виявлені умови її застосовності, задана відповідна група підстановок і явно побудований цикловий індекс [9, 10, 11].

Актуальною проблемою комбінаторики є генерація та підрахунок кількості комбінаторних конфігурацій, що мають задані властивості [17]. У роботах [18, 19] розглянуто побудову формальних описів комбінаторних множин, що мають складну структуру, на основі описів базових комбінаторних множин, до яких належать перестановки, сполучення та розміщення.

Визначення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

Специфіка багатьох прикладних комбінаторних задач вимагає відбиття в математичних моделях їх комбінаторної структури, що часто є складною й не може бути адекватно описана відомими комбінаторними множинами. Тому для математичного моделювання й розв’язання зазначених задач вводяться нові комбінаторні множини з необхідними властивостями. Класичні підходи до формалізації визначення комбінаторних множин, будучи універсальними, дають ефективні рішення для простих класів комбінаторних множин. Використання їх для складних комбінаторних конфігурацій призводить до громіздких результатів, не придатних на практиці.

Мета роботи – розроблення методу кодування з низьким енергоспоживанням, що дає змогу ефективно передавати або зберігати інформацію.

У статті розв’язуються такі **завдання**: аналіз методів класифікації комбінаторних структур, побудова системи типових представників класів еквівалентності та аналіз їх характеристик.

Матеріали й методи

У роботах [20, 21] розглянуто метод побудови кодів одиничної відстані та складений каталог для трьох розрядів. Із зростанням кількості розрядів істотно збільшується кількість кодів і розгляд усієї множини кодів стає важким завданням. Тому для його розв’язання був розроблений метод ієрархічної класифікації.

В основі методу лежить розбивка кодів на класи еквівалентності щодо заданої групи перетворень і дослідження властивостей представників класів.

Метою класифікації є побудова деякої повної системи різних представників, що розділяє будь-які два нееквівалентних об’єкти з розглянутої сукупності. У результаті класифікації множина об’єктів розпадається на попарно непересічні класи еквівалентності, у кожному з яких виокремлюється типовий представник.

Оскільки всі об’єкти, що належать одному класу еквівалентності, переходять один до одного внаслідок заданої групи перетворень, то для опису класу еквівалентності досить визначити типового представника, яким може бути обраний будь-який елемент, що належить розглянутому класу еквівалентності. Для однозначного опису типових представників

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. №3 (29)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

доцільне визначення об'єкта найпростішого виду, до якого можна привести досліджуваний математичний об'єкт за допомогою розглянутої групи перетворень, тобто побудова канонічних форм.

Канонічна форма математичного об'єкта – це стандартний спосіб подання цього об'єкта у вигляді математичного виразу, що уможливлює його ідентифікацію унікальним способом. Канонічні форми звичайно використовуються для того, щоб зробити роботу з класами еквівалентності більш ефективною [22].

Для класу об'єктів, для яких визначене відношення еквівалентності, канонічна форма полягає у виборі конкретного об'єкта в кожному класі (типового представника). Представник обирається однозначно серед об'єктів, що належать цьому класу.

Множина типових представників класів еквівалентності утворює систему різних представників. Отже, розглянутий підхід зводиться до рішення комбінаторних завдань, пов'язаних із визначенням існування системи різних представників для сімейства множин, і встановлення кількості систем різних представників, що задовольняють різні критерії.

Ієрархічна класифікація – система, у якій відношення класів утворюють ієрархічну класифікаційну структуру.

На рис. 1 зображена ієрархічна класифікаційна структура кодів одиничної відстані.

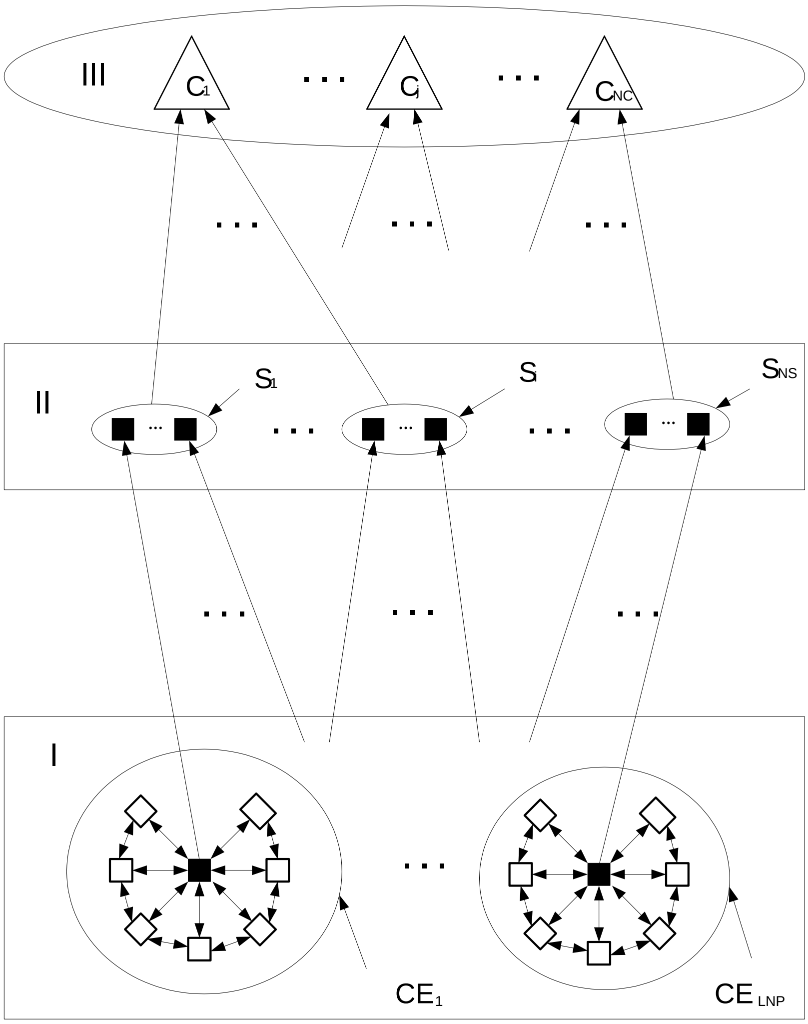

Рис. 1. Ієрархічна класифікаційна структура кодів одиничної відстані

Особливістю ієрархічної класифікації є розгляд на різних рівнях ієрархії різних множин об'єктів, об'єднання їх у класи щодо заданої для розглянутого рівня еквівалентності, визначення типових представників у кожному класі, побудова множин і типових представників. Тобто на кожному рівні класифікації відбувається перетворення множин і типових представників, що надходять із

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. No. 3 (29)

попереднього рівня, з огляду на встановлені відношення еквівалентності між класами, у нову множину типових представників, що надходить на наступний рівень класифікації. З переходом на більш високий рівень класифікації кількість типових представників зменшується.

Розглянемо класифікацію кодів одиничної відстані за допомогою описаного методу. У поданні матеріалу використовуються позначки і термінологія, прийняті в роботах [20, 21].

Код – бієктивне (взаємно однозначне) відтворення кінцевої впорядкованої множини символів, що належить деякому кінцевому алфавіту *Y*, на іншу, не обов'язково впорядковану, як правило, більшу множину символів *X* для кодування, передачі, зберігання або перетворення інформації [5].

Для кодів бієктивна функція має вигляд $f: Y \to X$, де Y – кінцева впорядкована множина символів, $Y = \{y_1, y_2, \ldots, y_k\}$; X – множина кодових слів, отримана внаслідок відтворення, $X = \{X^1, X^2, \ldots, X^k\}$; k – кількість кодових слів; n – кількість розрядів двійкового коду.

Кодове слово X^i містить n символів (кількість розрядів): $X^i = \{x_1^i \ldots x_n^i\}$; $x_j^i \in \{0,1\}$; $i = 1, \ldots, k$; $j = 1, \ldots, n$.

Кількість змін значень i-ї змінної у стовпці позначена h_i і визначається в такий спосіб:

$$h_i = \sum_{j=2}^{k} \left(x_{i,j-1} \oplus x_{i,j} \right), \quad i = 1, \ldots, n \ . \qquad (1)$$

У табл. 1 запропоновано табличне подання коду.

Таблиця 1. *Множина кодових слів та їх характеристики*

Y	X				
	x_1	…	x_j	…	x_n
y_1	x_1^1	…	x_j^1	…	x_n^1
y_2	x_1^2	…	x_j^2	…	x_n^2
…					
y_i	x_1^i	…	x_j^i	…	x_n^i
…					
y_k	x_1^k	…	x_i^k	…	x_n^k
H	h_1	…	h_j	…	h_n

Предметом цього дослідження є коди з одиничною відстанню, у яких кодові слова мають такі властивості:

– два сусідніх слова відрізняються тільки в одному розряді, тобто

$$\rho\left(X^i, X^{i+1}\right) = 1, \quad i = 1, \ldots, k-1, \qquad (2)$$

де ρ – відстань за Хемінгом між кодовими словами X^i та X^{i+1};

– загальна кількість змін значень розрядів у кодових словах дорівнює

$$\sum_{j=1}^{k-1} \rho\left(X^j, X^{j+1}\right) = k - 1. \qquad (3)$$

Код, у якому $\rho\left(X^1, X^k\right) = 1$, називається циклічним.

Збалансованість коду C визначається в такий спосіб:

$$C = \sum_{i=1}^{n} \left| h_i - \frac{\sum_{j=1}^{n} h_j}{n} \right|. \qquad (4)$$

Канонічною формою коду $W(X)$ називається його подання у вигляді

$$W(X) = x_1^1 \ldots x_n^1 x_1^2 \ldots x_n^2 \ldots x_1^i \ldots x_n^i \ldots x_1^k \ldots x_n^k .$$

Для компактності двійкова форма подання $W(X)$ може бути перетворена в шістнадцяткову форму.

На першому рівні класифікації розглядаються такі види перетворень: перестановка стовпців (P-перетворення) та інверсія стовпців (N-перетворення). P-перетворення описуються у вигляді множини перестановок стовпців вихідного коду $P = \{\pi_1, \ldots, \pi_n\}$, а N-перетворення – у вигляді множини $N = \{n_1, \ldots, n_n\}$, де $v_i = 1$, якщо виконується інверсія i-го стовпця, та $v_i = 0$ – в іншому разі. За умови зазначених перетворень зберігається властивість одиничної відстані між сусідніми двійковими словами в коді.

Код, отриманий унаслідок групи (P, N)-перетворень коду X, позначається $X(P, N)$, а його канонічна форма – $W(X(P, N))$. Коди X^1 і X^2 називаються PN-еквівалентними, якщо $X^1 = X^2(P, N)$.

У табл. 2 наведені приклади PN-еквівалентних кодів.

ISSN 2522-9818 (print)
Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. №3 (29) ISSN 2524-2296 (online)

Таблиця 2. *PN-еквівалентні коди*

X^1				X^2				X^3				X^4			
x_1^1	x_2^1	x_3^1	x_4^1	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_1^3	x_2^3	x_3^3	x_4^3	x_1^4	x_2^4	x_3^4	x_4^4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1

Множина кодів одиничної відстані розбивається на класи еквівалентності $CE_1 - CE_{LPN}$, де LPN – кількість класів еквівалентності першого рівня. Для i-го коду, що міститься в j-му класі еквівалентності X_j^i, визначається його канонічна форма $W\left(X_j^i\right)$. Типовий представник j-го класу PN-еквівалентності T_j визначається в такий спосіб: $T_j = min\left\{W\left(X^i{}_j\right)\right\}$, $i = 1,\ldots,n!2^n$; $j = 1,\ldots,LPN$. Множина типових представників для групи PN-перетворень позначається $MT = \left\{T_1,\ldots,T_{LPN}\right\}$.

Множина типових представників для групи PN-перетворень для $n=3$ і $k=8$ містить три елементи: $MT = \left\{01375462,\ 01326457,\ 01326754\right\}$.

У табл. 3 наведений фрагмент множини типових представників для групи PN-перетворень для $n=4$ і $k=16$.

Таблиця 3. *Множина типових представників для групи PN -перетворень для $n=4$ і $k=16$*

№	T	№	T	№	T	№	T
1	013264ceabf75d98	2	013754ce62abfd98	3	0137fb98a26ecd54	4	0137fd54c89bae62
5	013264c89baef75d	6	01326ec457fba89d	7	013762a89d54cefb	8	0137fec8a2645d9b
9	0132675d9bfea8c4	10	01375d9bfe64c8a2	11	01376ec45dfb98a2	12	0137fec8ab9d5462
13	013264cea89bf75d	14	013267fd54c89bae	15	01375d98c462aefb	16	013762ab98c45dfe
17	0132645d98ceabf7	18	01326eab98cdf754	19	013762a89bfecd54	20	0137feab98cd5462
21	01326457fb9dc8ae	22	01326754c8aefb9d	23	01375462abfd98ce	24	01375462aefdc89b
25	0132645dc89baef7	26	013267fec45d98ab	27	01375dfb98a264ce	28	01375dfec462a89b
29	01326457fb98aecd	30	01326754cdfb98ae	31	01375462aec89dfb	32	0137645dfec89ba2
33	01326754cd98abfe	34	013267fea8c45d9b	36	013754cdfb98a26e	36	013267feab98cd54
	…		…		…		…
325	01326457fdcea89b	326	01326457fecd9ba8	327	01326754cefd98ab	328	01326754cefd9ba8

На другому рівні класифікації розглядається множина типових представників MT, сформована на першому рівні. Для кожного типового представника, що містить ця множина, визначається його структура $S\left(X\right) = \left\langle H\left(X\right), \leq\right\rangle$. Типові представники $T_1 - T_{LPN}$ розподіляються на непересічні класи S-еквівалентності. Типові представники T_i і T_j називаються S-еквівалентними, якщо $S\left(T_i\right) = S\left(T_j\right)$. Унаслідок формується множина типових S-еквівалентних представників, позначена $MS = \left\{S_1,\ldots,S_{NS}\right\}$, де NS – кількість типових S-еквівалентних представників.

У табл. 4 подана множина типових S-еквівалентних представників для $n = 4$ і $k = 16$.

Таблиця 4. *Множина типових S-еквівалентних представників для $n = 4$ і $k = 16$*

№	s_1	s_2	s_3	s_4
1	1	2	4	8
2	1	2	5	7
3	1	2	6	6
4	1	3	3	8
5	1	3	4	7
6	1	3	5	6
7	1	4	4	6
8	1	4	5	5
9	2	2	3	8
10	2	2	4	7
11	2	2	5	6
12	2	3	3	7
13	2	3	4	6
14	2	3	5	5
15	2	4	4	5
16	3	3	3	6
17	3	3	4	5
18	3	4	4	4

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. No. 3 (29)

На третьому рівні класифікації розглядається множина типових представників MS, сформована на другому рівні. Для кожного типового представника, що містить ця множина, визначається його збалансованість $C(S)$. Типові представники $S_1,\ldots,S_{NS}$ розподіляються на непересічні класи C-еквівалентності. Типові представники S_i і S_j називаються C-еквівалентними, якщо $C(S_i)=C(S_j)$. Унаслідок формується множина типових C-еквівалентних представників, позначена $MC=\{C_1,\ldots,C_{NC}\}$, де NC – кількість типових C-еквівалентних представників.

У табл. 5 наведена множина типових C-еквівалентних представників для $n=4$ і $k=16$.

Характеристики множини типових C-еквівалентних представників для $n=5$ і $k=32$ зображені на рис. 2.

Таблиця 5. *Множина типових C-еквівалентних представників для* $n=4$ *і* $k=16$

C	№	*S*				*LPN*
		s_1	s_2	s_3	s_4	
9	1	1	2	4	8	1
	2	1	2	5	7	4
	3	1	2	6	6	3
8,5	4	1	3	3	8	1
	5	2	2	3	8	1
7	6	1	3	4	7	8
	7	1	3	5	6	14
	8	2	2	4	7	2
	9	2	2	5	6	9
6,5	10	2	3	3	7	8
5,5	11	1	4	4	6	10
	12	1	4	5	5	13
5,0	13	2	3	4	6	40
	14	2	3	5	5	22
4,5	15	3	3	3	6	6
3,5	16	2	4	4	5	30
3,0	17	3	3	4	5	50
1,5	18	3	4	4	4	16

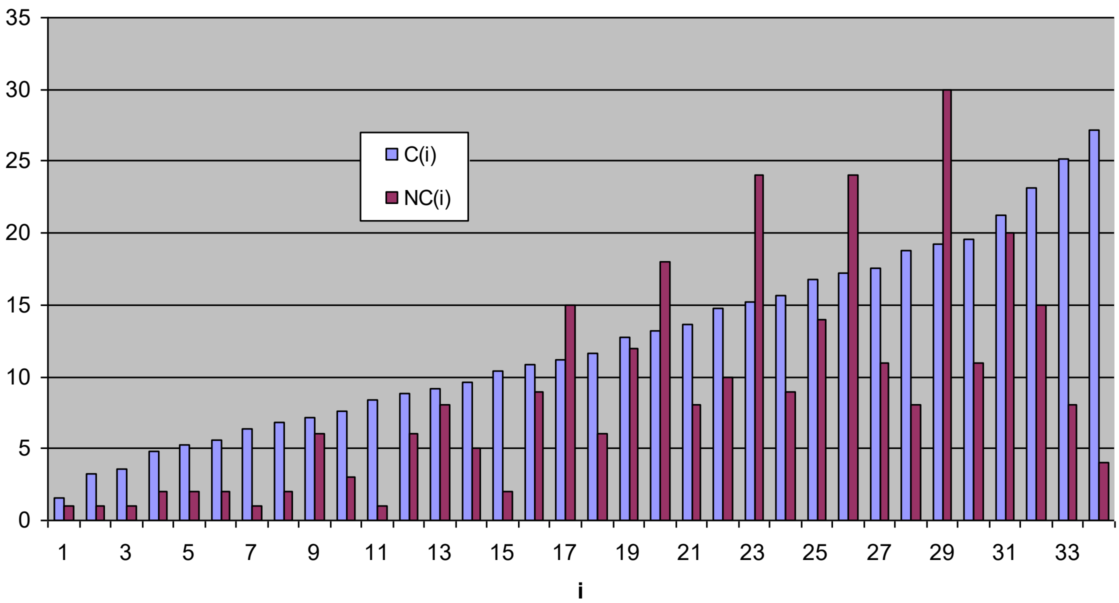

Рис. 2. Характеристики множини типових *C*-еквівалентних представників для $n=5$ і $k=32$

Результати досліджень та їх обговорення

За допомогою описаного методу ієрархічної класифікації енергоефективних кодів побудовано системи типових представників для різних значень n та визначені їх характеристики (табл. 6).

Позначки: V – кількість кодів у класі PN-еквівалентності; NS – кількість типових S-еквівалентних представників; NC – кількість типових C-еквівалентних представників; C_{Gray} – значення збалансованості коду Грея; $C_{\min}$ – мінімальне значення збалансованості кодів.

Таблиця 6. *Характеристики досліджених кодів для* $n=3,\ 4,\ 5$

n	V	NS	NC	C_{Gray}	$C_{\min}$	$C_{Gray}/C_{\min}$
3	48	3	3	3,3	1,3	2,5
4	384	18	10	9	1,5	6
5	3840	299	34	23,2	1,6	14,5

Наведені результати показують, що кількість типових варіантів кодів з одиничною відстанню значно менша від загальної кількості кодів, що дає змогу обирати оптимальне кодування без перебору варіантів. Ефективність застосування методу зростає із збільшенням кількості розрядів коду. Так, для $n=3$ поліпшення збалансованості оптимальних кодів становить 2,5 раза, 6 разів для $n=4$ та 14,5 раза для $n=5$.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Розглянуто актуальну проблему зменшення потужності, що розсіюється в глобальних лініях міжз'єднання за умови збереження високої продуктивності. Показано, що комутаційна активність шин є причиною значної частки загальної потужності, що розсіюється. Одним з ефективних методів зниження комутаційної активності під час зв'язку між пристроями або зв'язку на кристалі є застосування методів кодування з низьким енергоспоживанням.

Запропоновано метод ієрархічної класифікації енергоефективних кодів і побудови системи типових представників. Застосування розробленого методу дасть змогу аналізувати та обирати коди із заданими властивостями та отримувати кращі результати з погляду мережних затримок, витрат на електроенергію та інші конструктивні обмеження для комп'ютерних систем.

Подальші дослідження в цьому напрямі: розроблення методу побудови кодів із заданими структурами кодів і побудови перетворювачів кодів.

Список літератури

1. Taha T. B., Barzinjy A. A., Hussain F. H. Nanotechnology and computer science: Trends and advances. *Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems*. 2022. Vol. 2. 100011 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100011
2. Samanth R., Nayak S. G., Nempu P. B. A Novel Multiply-Accumulator Unit Bus Encoding Architecture for Image Processing Applications. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering.* 2023. Vol. 19. №. 1. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.1.2391
3. Chennakesavulu M., Prasad T. J., Sumalatha V. Data encoding techniques to improve the performance of system on chip. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences.* 2022. Vol. 34. №. 2. P. 492–503. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.12.003
4. West D. B. Combinatorial mathematics. Cambridge University Press, 2021. 988 p. DOI: 10.1017/9781107415829
5. Huffman W. C., Kim J. L., Solé P. Concise encyclopedia of coding theory. *Chapman and Hall/CRC,* 2021. 998 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781315147901
6. Стоян Ю. Г., Гребенник И. В. Комбинаторные виды для перечисления комбинаторных конфигураций со специальными свойствами. *Доп. НАН України*. 2010. № 7. С. 28–32. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/29920
7. Stanley R. P. Enumerative Combinatorics. Vol.1 second edition. Cambridge studies in advanced mathematics. 2011. 440 p.
8. Polya G. Mathematics and plausible reasoning, Volume 1: Induction and analogy in mathematics. Princeton University Press, 2020. 296 p.
9. Charalambides C. A. Enumerative combinatorics. *Chapman and Hall/CRC,* 2018. 632 p. DOI https://doi.org/10.1201/9781315273112
10. Strozecki Y. Enumeration complexity. *Bulletin of EATCS*. 2019. Vol. 3. №. 129. URL: http://bulletin.eatcs.org/index.php/beatcs/article/view/596/605
11. Lucatero C. R. Combinatorial Enumeration of Graphs. *Probability, Combinatorics and Control*. London, UK: IntechOpen. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.88805
12. Klazar M. Combinatorial Algebraic Counting. Prague. 2022. 51 p.
13. Cameron N. T., Nkwanta A. Riordan matrices and lattice path enumeration. *Not. Am. Math. Soc.* 2023. Vol. 70. P. 231–242. DOI: 10.3390/appliedmath3010012
14. Zhongmu C. An extension of Burnside theorem. *Acta Math. Sinica.* 1964. Vol. 14. P. 75–77.
15. Harary F., Palmer E. M. Graphical enumeration. *Elsevier*, 2014. 286 p.
16. De Bruijn N. G. Polya's theory of counting. *Applied combinatorical mathematics.* 1964. P. 144–184.
17. Mala F. A. Three Open Problems in Enumerative Combinatorics. *Applied Mathematics and Computation.* 2023. Vol. 7. № 1. P. 24–27. DOI: 10.26855/jamc.2023.03.004
18. Shablya Y., Merinov A., Kruchinin D. Combinatorial Generation Algorithms. *Mathematics.* 2024. Vol. 12. №. 8. P. 1–18. DOI: https://doi.org/10.3390/math12081207
19. Стоян Ю. Г., Гребенник И. В. Описание классов комбинаторных конфигураций на основе отображений. *Доп. НАН України.* 2008. № 10. С. 28–31.

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. No. 3 (29)

20. Yareshchenko, V., Kosenko, V. Coding to reduce the energy of data movement. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць.* Полтава: ПНТУ. 2023. V. 1 (71). P. 159–162. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159
21. Ярещенко В.В., Косенко В.В. Кодування з низьким енергоспоживанням. *Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: зб. наук. пр. за матеріалами IX Всеукр. наук.-практ. конф., 10 листоп. 2023 р.* Полтава: Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. С. 67–68. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14093
22. Zhang, J., Yang, G., Hung, W. N. A canonical-based NPN Boolean matching algorithm utilizing Boolean difference and cofactor signature. *IEEE Access.* 2017. Vol. 5. C. 27777–27785. DOI 10.1109/ACCESS.2017.2778338

References

1. Taha, T. B., Barzinjy, A. A., Hussain, F. H. (2022), "Nanotechnology and computer science: Trends and advances". *Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems*. Vol. 2. 100011 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100011
2. Samanth, R., Nayak, S. G., Nempu, P. B. (2023), "A Novel Multiply-Accumulator Unit Bus Encoding Architecture for Image Processing Applications". *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering.* Vol. 19. No. 1. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.1.2391
3. Chennakesavulu, M., Prasad, T. J., Sumalatha, V. (2022), "Data encoding techniques to improve the performance of system on chip". *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences.* Vol. 34. No. 2. P. 492–503. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.12.003
4. West, D. B. (2021), "Combinatorial mathematics". *Cambridge University Press.* 988p. DOI: 10.1017/9781107415829
5. Huffman, W. C., Kim, J. L., Solé, P. (2021), "Concise encyclopedia of coding theory". *Chapman and Hall/CRC.* 998 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781315147901
6. Stoyan, Yu. G., Grebennik, I. V. (2010), "Combinatorial types for enumeration of combinatorial configurations with special properties". *Suppl. NAS of Ukraine.* No.7. P. 28–32. available at: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/29920
7. Stanley, R. P. (2011), "Enumerative Combinatorics". Vol. 1 second edition. Cambridge studies in advanced mathematics. 440 p.
8. Polya, G. (2020), "Mathematics and plausible reasoning, Volume 1: Induction and analogy in mathematics". Princeton University Press. 296 p.
9. Charalambides, C. A. (2018), "Enumerative combinatorics". *Chapman and Hall/CRC.* 632 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781315273112
10. Strozecki, Y. (2019), "Enumeration complexity". *Bulletin of EATCS.* Vol. 3. No. 129. available at: http://bulletin.eatcs.org/index.php/beatcs/article/view/596/605
11. Lucatero, C. R. (2019), "Combinatorial Enumeration of Graphs". *Probability, Combinatorics and Control*. London, UK: IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.88805
12. Klazar, M. (2022), "Combinatorial Algebraic Counting". Prague. 51 p.
13. Cameron, N. T., Nkwanta, A. (2023), "Riordan matrices and lattice path enumeration". *Not. Am. Math. Soc.* Vol. 70. P. 231–242. DOI: 10.3390/appliedmath3010012
14. Zhongmu, C. (1964), "An extension of Burnside theorem". *Acta Math. Sinica.* Vol. 14. P. 75–77.
15. Harary, F., Palmer, E. M. (2014), "Graphical enumeration". *Elsevier*. 286 p.
16. De Bruijn, N. G. (1964), "Polya's theory of counting". *Applied combinatorical mathematics.* P. 144–184.
17. Mala, F. A. (2023). "Three Open Problems in Enumerative Combinatorics". *Applied Mathematics and Computation.* Vol. 7. No. 1. P. 24–27. DOI: 10.26855/jamc.2023.03.004
18. Shablya, Y., Merinov, A., Kruchinin, D. (2024), "Combinatorial Generation Algorithms". *Mathematics.* Vol. 12. No. 8. P. 1–18. DOI: https://doi.org/10.3390/math12081207
19. Stoyan, Yu. G., Grebennik, I. V. (2008), "Description of classes of combinatorial configurations based on mappings". *Dop. NAS of Ukraine*. No. 10. P. 28–31.
20. Yareshchenko, V., Kosenko, V. (2023), "Coding to reduce the energy of data movement". *Management, navigation and communication systems.* Collection of scientific works. Poltava: PNTU. Vol. 1 (71). P. 159–162. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159
21. Yareschenko, V. V., Kosenko, V. V. (2023), "Low energy coding". *Electronic and mechatrony systems: theory, innovation, practice: Coll. Sciences. BC according to the materials of IX All -Ukrainian. scientific-practical. conf., 10 November.* Poltava: Nat. Univ. Yuri Kondratyuk. P. 67–68. available at: https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14093
22. Zhang, J., Yang, G., Hung, W. N. (2017), "A canonical-based NPN Boolean matching algorithm utilizing Boolean difference and cofactor signature". *IEEE Access.* Vol. 5. P. 27777–27785. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2778338

Надійшла (Received) 20.08.2024

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Відомості про авторів / About the Authors

Ярещенко Владислав Валерійович – Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Полтава, Україна; e-mail: vlad.yareschenko@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7682-0572

Косенко Віктор Васильович – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", професор кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Полтава, Україна; Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: kosvict@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4905-8508

Vladyslav Yareshchenko – National University "Yuri Kondratyuk" Poltava Polytechnic, PhD student at the Department of Automation, Electronic and Telecommunication, Poltava, Ukraine.

Viktor Kosenko – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National University "Yuri Kondratyuk" Poltava Polytechnic, Professor at the Department of Automation, Electronic and Telecommunication, Poltava, Ukraine; Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

LOW-POWER CODING METHOD IN DATA TRANSMISSION SYSTEMS

The object of the study is the Network-on-Chip (NoC) technology, which has become a popular choice for the on-chip communication architecture of modern System-on-Chip (SoC) devices. The **subject matter** of the article is methods of reducing dissipated power in NoC and SoC. The **goal** of the work is: development of a low-power coding method that allows for the efficient transmission or storage of information. The following **tasks** are solved in the article: analysis of classification methods for combinatorial structures, construction a system of typical representatives and analysis of their characteristics. The research **methods** are based on the use of set theory, system theory and combinatorics. The following **results** are obtained: analyzed factors that affect the dissipated power, considered principles of constructing energy-efficient codes. It is shown that switching activity significantly affects the total power and one of the effective methods for reducing switching activity during communication between devices or on-chip communication is the use of low-power coding methods. A method of hierarchical classification of unit distance codes and algorithms for solving step-by-step problems have been developed. The method is based on the invariant approach and construction of a system of different representatives. Estimates of their number have been obtained, characteristics have been determined, and catalogs of typical representatives have been formed. **Conclusions.** The article analyzes factors that affect dissipated power, and considers the principles of constructing energy-efficient codes. A method of hierarchical classification of single distance codes and algorithms for solving step-by-step problems have been developed, and catalogs of typical representatives have been formed. The application of the developed method will allow developers to analyze and select codes with the best properties and, as a result, obtain better results in terms of network delays, energy costs, and other design limitations for computer systems.

Keywords: coding; unit distance codes; energy efficient coding; switching activity; equivalence; classification; enumeration.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ярещенко В. В., Косенко В. В. Метод кодування з низьким енергоспоживанням у системах передачі даних. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 121–129. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121

Yareshchenko, V., Kosenko, V. (2024), "Low-power coding method in data transmission systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 121–129. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121