УДК 621.394.762.1

Н.К. ТИМОФІЄВА

ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ КОНСТРУКЦІЇ КООРДИНАТНОГО КОМУТАТОРА

Abstract: *An approach of optimization of construction of crosspoint switch, in which their decrease of quantity of switching element, placing on its surface made up at the expense of multilayer its realization, is proposed. A coefficients of reduction of crosspoint switch, with taking into account theirs an optimal variant of its construction is nonblocking, are defined. A new type of crosspoint switch is constructed. It is volumetric.*
Key words: *crosspoint switch, switching element, matrix, combinatorial optimization, permutation.*

Анотація: *Запропоновано спосіб оптимізації конструкції координатного комутатора, у якого зменшення кількості розміщених на його поверхні елементів комутації проводиться за рахунок багатошарового виконання. Визначено коефіцієнти зменшення координатного комутатора, з урахуванням яких оптимізований варіант його конструкції залишається неблокуючим. Розроблено новий тип координатного комутатора – об'ємний.*
Ключові слова: *координатний комутатор, елемент комутації, матриця, комбінаторна оптимізація, перестановка.*

Аннотация: *Предложен способ оптимизации конструкции координатного коммутатора, в котором уменьшение количества размещенных на его поверхности элементов коммутации осуществляется за счет многослойного выполнения. Определены коэффициенты уменьшения координатного коммутатора, при учете которых оптимизированный вариант его конструкции остается неблокирующим. Разработан новый тип координатного коммутатора – объемный.*
Ключевые слова: *координатный коммутатор, элемент коммутации, матрица, комбинаторная оптимизация, перестановка.*

1. Вступ

Аналізується координатний комутатор, який являє собою матрицю з входами і виходами, з метою мінімізації кількості елементів, розміщених на його поверхні. Розв'язок поставленої задачі досягається за рахунок зменшення кількості рядків і стовпців матриці та перенесення шин комутації на паралельні поверхні. В результаті одержано багатошарову конструкцію координатного комутатора. Кожен його шар складається з діелектрика з розміщеними на ньому ортогональними шинами, в точках перетину яких знаходиться спільний для всіх шарів з'єднувальний елемент. Доведені теоре-ми установлюють оптимальні коефіцієнти зменшення координатного комутатора, з урахуванням яких одержаний варіант його конструкції залишається неблокуючим.

Уточнимо деякі терміни.

Як відомо [1–4], одним із основних компонентів інформаційно-обчислювальної системи є комутаційна мережа, яка складається з центрів комутації, з'єднаних між собою каналами зв'язку. Під комутаційною мережею мають на увазі систему, яка забезпечує шляхи передачі інформації між входами і виходами комутаційного вузла.

Комутаційні системи можуть бути повнодоступні і неповнодоступні. У повнодоступній комутаційній системі для її початкового стану можна установити зв'язок з будь-яким входом і виходом, незалежно від уже існуючих з'єднань. Якщо в комутаторі наступний зв'язок може бути заблоковано раніше встановленими зв'язками, – це неповнодоступна комутаційна система. Конфліктною називається ситуація, коли два входи потрібно з'єднати з одним виходом.

За режимами комутаційні системи розподіляються на одиничні, пакетні і разові. При одиничній комутації з'єднання виникають або закінчуються по одному, при пакетному – групами, при разовому – всі одночасно.

Блокуючою комутаційною схемою називається така, в якій нове з'єднання не може бути установлено без руйнування з'єднань, що вже є. Під строго неблокуючою комутаційною системою мають на увазі таку, у якій необхідні з'єднання між входами і виходами можуть бути установлені незалежно від того, яким чином уже були встановлені попередні з'єднання.

Існує дуже багато як вітчизняних, так і закордонних розробок координатних комутаторів різних типів, наприклад, [5–12]. Але пошук структур координатних комутаторів, які дозволяють збільшувати кількість входів і виходів, залишаючись при цьому строго неблокуючими і малогабаритними, є все ще актуальною проблемою.

Як правило, для оптимізації комутаційних систем використовується теорія комбінаторного аналізу і комбінаторної оптимізації [1–3, 5, 6, 13]. Нижче, використовуючи властивості перестановок і комбінаторних матриць [14, 15], оптимізуємо конструкцію координатного комутатора.

2. Математична модель об'ємного координатного комутатора

Побудуємо математичну модель координатного комутатора, який працює у разовому режимі, тобто n сигналів одночасно поступають на входи і n сигналів одночасно з'являються на виходах [16–17].

Координатний комутатор, який містить n входів і n виходів, подамо у вигляді матриці $C = \left\| c_{lj} \right\|_{nxn}$, елементи c_{lj} якої відображають елементи комутації, розміщені в узлах перетину горизонтальних і вертикальних каналів зв'язку. Рядком матриці вважатимемо горизонтальний ряд елементів комутації і горизонтальний канал зв'язку, зв'язаний з виходом. Стовпцем матриці вважатимемо вертикальний канал зв'язку, з'єднаний із входом, і вертикальний ряд елементів комутації. У подальшому вертикальний канал зв'язку назвемо шинами стовпця, а горизонтальний – шинами рядка матриці. Елементи комутації за допомогою шин рядків і стовпців з'єднують відповідні входи і виходи.

Номера вхідних сигналів, розміщених в деякому визначеному порядку, подамо перестановкою $\omega^k = (\omega_1^k, ..., \omega_n^k) \in \Omega$, а номера вихідних сигналів – перестановкою $\omega^{'i} = (\omega_1^{'i}, ..., \omega_n^{'i}) \in \Omega^{'}$, де Ω – множина всіляких перестановок номерів вхідних сигналів; $\Omega^{'}$ – множина всіляких перестановок номерів вихідних сигналів; $k, i \in \{1, ..., n!\}$. Для ω^k-ї перестановки вхідних сигналів поставимо у відповідність $\omega^{'i}$-у перестановку вихідних сигналів. Пару $(\omega^k, \omega^{'l})$ назвемо комбінацією вхідних і вихідних сигналів комутатора, що працює у разовому режимі. У подальшому цю пару перестановок назвемо комбінацією сигналів. Позначимо її $d_s(\omega^k, \omega^{'i})$. Умовимося, що комбінація сигналів існує, якщо для пари $(\omega^k, \omega^{'l})$ ні один сигнал не блокується. Якщо хоча б один сигнал блокується, комбінації сигналів не існує. Множину всіляких комбінацій сигналів позначимо $G(\Omega, \Omega^{'})$, а їх кількість у цій множині – як $\left| G(\Omega, \Omega^{'}) \right|$. Так як для одиничної комутації k-й перестановці $\omega^k \in \Omega$ відповідає $n!$ перестановок $\omega^{'i} \in \Omega^{'}$, то кількість комбінацій сигналів строго неблокуючого комутатора дорівнює $(n!)^2$, тобто $\left| G(\Omega, \Omega^{'}) \right| = (n!)^2$. Якщо комутатор неблокуючий в широкому значенні слова, то кількість $d_s(\omega^k, \omega^{'i})$ для нього позначимо $\left|G(\Omega, \Omega^{'})\right| \cong (n!)^2$. Під частково доступним у даному випадку вважаємо комутатор, у якого кількість комбінацій сигналів менша, ніж $(n!)^2$, тобто $\left|G(\Omega, \Omega^{'})\right| < (n!)^2$. Якщо у комутатора не існує ні однієї комбінації сигналів, комутатор недоступний, а $\left|G(\Omega, \Omega^{'})\right| = 0$.

У координатному комутаторі один елемент комутації $c_{l\,j}$, який розміщений на перетині l-го рядка і j-го стовпця, з'єднує лише вхід l і вихід j. Розглянемо такий тип координатного комутатора, у якого в одній точці можуть перетинатися декілька горизонтальних і вертикальних шин. Для цього зменшимо кількість рядків і стовпців матриці C у кілька разів. Шини, що належать виключеним рядкам і стовпцям, розмістимо у тих, що залишилися. Одержимо нову матрицю, рядки і стовпці якої містять один ряд елементів комутації і кілька шин, які зв'язують входи і виходи. В цьому комутаторі для забезпечення повнодоступності один елемент комутації повинен з'єднувати декілька входів і виходів. Розмістимо утворену матрицю на кількох шарах таким чином. На одних шарах у кожному стовпці розмістимо одну шину і один ряд елементів комутації. Рядки містять лише елементи комутації. На інших шарах кожен рядок містить одну шину і один ряд елементів комутації. Стовпці містять лише елементи комутації. Зв'язок між шарами забезпечується спільними для них елементами комутації. Утворений комутатор назвемо об'ємним [16–17].

Об'ємний комутатор задамо матрицею $Q(K_t) = \bigcup_{p=1}^{Z(K_t)} C^p(K_t)$, де $C^p(K_t) = \left\| c_{lj}^p(K_t) \right\|_{\frac{n}{\eta} x \frac{n}{\zeta}}$ – p-й її шар: $Z(K_t)$ – кількість шарів; η – коефіцієнт зменшення рядків і дорівнює кількості шин, розміщених в одному рядку; ζ – коефіцієнт зменшення стовпців і дорівнює кількості шин, розміщених в одному стовпці матриці $Q(K_t)$, причому $n \equiv 0 \bmod(\eta)$, $n \equiv 0 \bmod(\zeta)$, $\eta, \zeta, n \in \{2,4,...,2j\}$, $\eta \le \frac{n}{\eta}$, $\zeta \le \frac{n}{\zeta}$, $j \in \left\{1,...,\frac{n}{2}\right\}$; K_t – t-й варіант об'ємного комутатора, утворений із заданого координатного. Позначимо ці варіанти множиною $K = \{K_1,...,K_q\}$, де q – їх кількість. Кількість елементів комутації об'ємного комутатора типу K_t позначимо $P(K_t)$, а площу, яку займає комутатор типу K_t як $S(K_t)$.

Задача побудови об'ємного комутатора полягає в тому, щоб для вибраного його типу кількість комбінацій сигналів дорівнювала $\left|G(\Omega, \Omega^{'})\right| = (n!)^2$ і при цьому досягався б екстремум цільової функції, тобто

$$F(K_t) = \underset{K_t \in K}{ext} \sum_{j=1}^{3} \gamma_j \; f_j(K_t), \tag{1}$$

де $f_1(K_t) = P(K_t)$; $f_2(K_t) = Z(K_t)$; $f_3(K_t) = S(K_t)$ – функції, що являють собою часткові критерії, за допомогою яких оцінюються варіанти розв'язку задачі; $\sum_{j=1}^{3} \gamma_j = 1$ – вагові коефіцієнти. Отже, при зменшенні елементів комутації, розміщених на поверхні, площа комутатора зменшується, а кількість шарів збільшується.

3. Оптимізація координатного комутатора

Використовуючи властивості комбінаторних матриць і перестановок [14, 15], визначимо, на яке число можна зменшити кількість рядків і стовпців у координатному комутаторі, щоб одержаний, об'ємний, був повнодоступний.

Теорема 1. Для $n!$ комбінацій сигналів $d_s(\omega^{k*}, \omega^{'i})$, $k* \in \{1,...,n!\}$, $i = \overline{1, n!}$, координатного комутатора розміром $n\ x\ n$ c_{lj}-й елемент комутації приймає участь у комутації сигналів $(n-1)!$ раз.

Доведення. Нехай задано множину всіляких перестановок вхідних Ω і вихідних $\Omega^{'}$ сигналів. Зафіксуємо перестановку, що задає вхідні сигнали $\omega^{k*} \in \Omega$. Для неї визначимо $n!$ комбінацій сигналів $d_s(\omega^{k*}, \omega^{'i})$.

Розглянемо s-у комбінацію сигналів $d_s(\omega^{k*}, \omega^{'i})$. З'єднання входів і виходів, на які поступають відповідні сигнали $\omega_a^{k*}, \omega_b^{'i}$, $\omega^{k*} = (\omega_1^{k*},..., \omega_a^{k*},...,\omega_n^{k*})$, $\omega^{'i} = (\omega_1^{'i},..., \omega_b^{'i},...,\omega_n^{'i})$, проводиться завдяки c_{lj}-му елементу комутації. У перестановці $\omega^{'i} = (\omega_1^{'i},..., \omega_a^{'i},...,\omega_b^{'i},...,\omega_n^{'i})$ проведемо транспозицію двох елементів $\omega_a^{'i}$ і $\omega_b^{'i}$. Одержимо нову перестановку $\omega^{'i+1} = (\omega_1^{'i+1},..., \omega_b^{'i+1},...,\omega_a^{'i+1},...,\omega_n^{'i+1})$ і $(s+1)$-у комбінацію сигналів комутатора $d_{s+1}(\omega^{k*}, \omega^{'i+1})$. Неважко замітити, що в $(s+1)$-й комбінації всі пари сигналів, крім $\omega_a^{k*}, \omega_b^{'i+1}$ і $\omega_b^{k*}, \omega_a^{'i+1}$, з'єднуються тими ж елементами комутації, що і для s-ї комбінації сигналів. Звідси випливає, що для $n!$ комбінацій сигналів c_{lj}-й елемент комутації приймає участь у комутації сигналів стільки разів, скільки в l-й позиції $\omega^{'i}$-ї перестановки для усіх $i = \overline{1, n!}$ міститься один і той же елемент $\omega_l^{'i}$. Як зазначено в роботі [15], в j-му стовпці упорядкованої множини перестановок Ω, яка подана прямокутною матрицею, ω_j^{k}-й елемент зустрічається $(n-1)!$ раз. З цього випливає, що c_{lj}-й елемент комутації матриці C, який лежить на перетині l-го рядка і j-го стовпця, приймає участь у з'єднанні $(n-1)!$ раз, що і доводить теорему 1.

Наслідок 1. В $(n!)^2$ комбінації сигналів c_{lj}-й елемент комутації матриці C приймає участь у з'єднанні $[(n-1)!]^2$ раз.

Якщо шину j-го стовпця координатного комутатора з'єднати з усіма його елементами комутації, а шини рядків залишити вільними, $j=\overline{1,n}$, то для реалізації у ньому s-ї комбінації сигналів необхідно провести n з'єднань.

Проведемо мінімізацію координатного комутатора за критерієм $f_1(K_t)$, тобто проведемо мінімізацію числа елементів комутації, розміщених на його поверхні. Для цього зменшимо число його рядків і стовпців.

Дослідимо спочатку координатний комутатор порядку n, у якого зменшимо кількість рядків у η раз. В його j-му рядку міститься η шин і один ряд елементів комутації.

Розмістимо отриманий комутатор на кількох шарах таким чином. На одному шарі розмістимо n стовпців, в j-му з яких міститься одна вертикальна шина і l елементів комутації, причому шина має з'єднання з усіма l елементами, $j\in\{1,\ldots,n\}$, $l=\overline{1,\frac{n}{\eta}}$. На кожному з інших шарів розмістимо $\frac{n}{\eta}$ рядків, в l-му з них міститься горизонтальна шина і n не зв'язаних з нею елементів комутації, $l\in\{1,\ldots,\frac{n}{\eta}\}$. Кількість шарів у такому комутаторі дорівнює $\eta+1$, а $Q(K_t)=\bigcup_{p=1}^{\eta+1}C^p(K_t)$.

Так як для усіх матриць $C^p(K_t)$, $p=\overline{1,\eta+1}$ елементи комутації спільні, то координатний комутатор подамо у вигляді прямокутної матриці $Q(K_t)=\left\|g_{lj}(K_t)\right\|_{\frac{n}{\eta}\,x\,n}$, де $g_{lj}(K_t)$ – його елемент комутації.

Теорема 2. У координатного комутатора $Q(K_t)$ розміром $\frac{n}{\eta}\,x\,n$, який утворений зменшенням або рядків або стовпців, $\left|G(\Omega,\Omega')\right|=(n!)^2$.

Доведення. В координатному комутаторі із зменшенням елементів комутації шини, які зв'язують входи або виходи, переміщуються на інші шари. Комутація l-го входу і j-го виходу проводиться завдяки спільному для усіх шарів елементу комутації $g_{lj}(K_t)$, $j\in\{1,\ldots,n\}$, $l\in\left\{1,\ldots,\frac{n}{\eta}\right\}$. Замітимо, що j-й вихід комутатора, на який поступає сигнал ω_j^i, l-й вхід, на який поступає сигнал ω_l^k, і елемент комутації $g_{lj}(K_t)$ на перетині l-го рядка і j- го стовпця в s- й комбінації сигналів приймає участь лише один раз. Тим самим в s-й комбінації сигналів раніше установлені зв'язки не блокують наступних і $\left|G(\Omega,\Omega')\right|=(n!)^2$, що характерно для строго неблокуючих комутаторів.

Теорему 2 доведено.

Наслідок 2. В координатному комутаторі розмірністю $\frac{n}{\eta}\, x\, n$ при реалізації s-го варіанта комбінації сигналів в l-му рядку може бути використано b елементів комутації $\mathrm{l}=\overline{1,\ \frac{n}{\eta}}$, b – кількість шин, розміщених в одному рядку.

Наслідок 3. В координатному комутаторі розмірністю $\frac{\mathrm{n}}{\eta}\, \mathrm{x}\, \mathrm{n}$ для реалізації s-го варіанта комбінації сигналів необхідно провести n з'єднань.

Наслідок 4. У координатного комутатора розмірністю $\frac{n}{\eta}\, x\, n$ $\left|G(\Omega, \Omega^{'})\right| = (n\,!)^2$, а кількість шарів, на яких він розміщений, дорівнює $\eta+1$.

Проведемо аналіз координатного комутатора розмірністю $\frac{n}{\eta}\, x\, \frac{n}{\zeta}$, у якого елементи комутації зменшуються завдяки одночасному зменшенню рядків і стовпців. Розмістимо його на кількох шарах таким чином, як і комутатор розмірністю $\frac{n}{\eta}\, x\, n$. Так як будь-який стовпець і будь-який рядок містить більше, ніж одну шину, то останні не мають постійних зв'язків з елементами комутації. Для простоти викладу умовимося, що рядок (стовпець) матриці $Q(K_t)$ містить один ряд елементів комутації і кілька шин. Кількість шарів, на яких розміщено комутатор розмірністю $\frac{n}{\eta}\, x\, \frac{n}{\xi}$, дорівнює $\eta+\zeta$.

Теорема 3. Якщо координатний комутатор порядку n зменшити по рядках в η раз, а по стовпцях в два рази, то для одержаного варіанта $\left|G(\Omega, \Omega^{'})\right| \cong (n\,!)^2$.

Доведення. Нехай в l-му рядку комутатора містяться η шин і один ряд елементів комутації. В j-му стовпці знаходяться дві шини і один ряд елементів комутації, $\mathrm{l}\in\left\{1,\ldots,\frac{\mathrm{n}}{\eta}\right\}$, $j\in\left\{1,\ldots,\frac{n}{2}\right\}$. Для $d_s(\omega^k, \omega^{'i})$-ї комбінації сигналів необхідно з'єднати дві шини з l-го рядка і дві шини з j-го стовпця. Так як один елемент комутації може з'єднувати два входи і два виходи, то, якщо комутацію проводити не за строгою схемою, деякі зв'язки з цієї комбінації сигналів можуть бути заблоковані попередніми з'єднаннями або заблокувати наступні.

Розглянемо ділянку комутатора, обмежену елементами комутації $g_{l\,j}(K_t)$, $g_{l+1\,j}(K_t)$, $g_{l\,j+1}(K_t)$, $g_{l+1\,j+1}(K_t)$. Для усіх з'єднань $d_s(\omega^k, \omega^{'i})$-го варіанта комбінації сигналів, у якого з'єднання проводяться на перетині l-го рядка і j-го стовпця, таких ділянок може бути $(n-1)$. Так як для j-го стовпця, l-го рядка, $(j+1)$-го стовпця і $(\mathrm{l}+1)$-го рядка елементи комутації $\mathrm{g}_{\mathrm{l+1\,j+1}}(\mathrm{K_t})$ або $\mathrm{g}_{\mathrm{l\,j+1}}(\mathrm{K_t})$, $\mathrm{g}_{\mathrm{l+1\,j+1}}(\mathrm{K_t})$, або $\mathrm{g}_{\mathrm{l+1\,j}}(\mathrm{K_t})$, $\mathrm{g}_{\mathrm{l+1\,j+1}}(\mathrm{K_t})$ спільні, то остання ділянка комутатора n має лише одну точку для з'єднання двох горизонтальних і двох вертикальних шин. У цьому випадку, щоб реалізувати $d_s(\omega^k, \omega'^i)$-у комбінацію сигналів так, щоб жоден зв'язок не заблокувався, необхідно одну шину j-го стовпця розмістити зліва, а другу – справа від ряду елементів комутації. Відповідно $\frac{n}{2}$ шин l-го рядка розмістимо зверху, а $\frac{n}{2}$ шин – внизу ряду елементів комутації. Такий варіант дозволяє, завдяки елементам комутації $g_{11}(K_t)$, $g_{21}(K_t)$, $g_{12}(K_t)$, $g_{22}(K_t)$ або $g_{\frac{n}{\eta}-1\,\frac{n}{\zeta}-1}(K_t)$, $g_{\frac{n}{\eta}\,\frac{n}{\zeta}-1}(K_t)$, $g_{\frac{n}{\eta}-1\,\frac{n}{\zeta}}(K_t)$, $g_{\frac{n}{\eta}\,\frac{n}{\zeta}}(K_t)$, з'єднати чотири шини стовпця і чотири шини рядка. Для з'єднання п'ятої шини стовпця і рядка можна використовувати елемент комутації $g_{23}(K_t)$ або $g_{32}(K_t)$, які не є спільними для третьої ділянки, що містить ці шини. В результаті на n-й ділянці залишаються два вільних елементи комутації, завдяки яким з'єднуються два зв'язки, що залишилися. Аналогічним способом можна довести, що всі $(n!)^2$ комбінації сигналів реалізуються без блокування. А так як для деяких варіантів із $d_s(\omega^k, \omega'^i)$ з'єднання необхідно проводити з урахуванням попередніх зв'язків, то такий комутатор неблокуючий в широкому значенні слова і для нього $\left|G(\Omega, \Omega')\right| \cong (n!)^2$, що і доводить теорему 3.

Наслідок 5. Якщо у координатного комутатора розміром $\frac{n}{\eta} x \frac{n}{\zeta}$, $2 < \eta \le \frac{n}{\eta}$, $2 < \zeta \le \frac{n}{\zeta}$, $n \ge \left(\frac{n}{\eta} \cdot \frac{n}{\zeta}\right)$, то $\left|G(\Omega, \Omega')\right| < (n!)^2$.

Наслідок 6. Якщо у координатного комутатора розміром $\frac{n}{\eta} x \frac{n}{\zeta}$, $n < \left(\frac{n}{\eta} \cdot \frac{n}{\zeta}\right)$, то для нього $\left|G(\Omega, \Omega')\right| = 0$.

Наслідок 7. Якщо елемент комутації $\mathrm{g}_{\mathrm{l\,j}}(\mathrm{K_t})$, $\mathrm{l} \in \left\{1,\dots,\frac{\mathrm{n}}{\eta}\right\}$, $j \in \left\{1,\dots,\frac{n}{\zeta}\right\}$, в координатному комутаторі розміром $\frac{n}{\eta} x \frac{n}{\zeta}$ з'єднує одночасно η зв'язків, причому $\eta \le \zeta$, то для нього $\left|G(\Omega, \Omega')\right| \cong (n!)^2$.

Наслідок 8. Якщо координатний комутатор зменшується лише по рядках або по стовпцях, а кількість стовпців (рядків) залишається незмінною, то кількість з'єднань, необхідних для реалізації s-ї комбінації сигналів, дорівнює n.

З викладеного матеріалу видно, що при мінімізації елементів комутації у координатному комутаторі зменшується площа, яка ним займається, і збільшується кількість шарів, на яких він розміщується. Таким чином, при оптимізації функції (1) для вибору допустимої конструкції комутатора необхідно користуватися оцінками, що задаються виробником.

5. Висновки

На основі викладених результатів розроблено новий тип координатного комутатора. З метою мінімізації його площі матриця виконана багатошаровою з кількістю шарів $\frac{\eta}{m}+\frac{\zeta}{r}$, де η – коефіцієнт зменшення рядків і дорівнює кількості шин, розміщених у одному рядку; ζ – коефіцієнт зменшення стовпців і дорівнює кількості шин, розміщених у одному стовпці; m – число шин рядків, розміщених на одному шарі; r – число шин стовпців, розміщених на одному шарі. Кожен шар комутатора складається з діелектрика з розміщеними на ньому ортогональними шинами, виконаними друкованим монтажем. У точках їх перетину знаходиться спільний для усіх шарів з'єднувальний елемент з контактами, кожен із яких з'єднується з відповідним входом і виходом.

Отже, позитивний ефект від об'ємного комутатора полягає у тому, що завдяки його розміщенню на $\frac{\eta}{m}+\frac{\zeta}{r}$ шарах зменшується поверхня комутатора більше, ніж в $\eta\zeta$ разів, за рахунок зменшення в $\eta\zeta$ разів кількості елементів комутації, розміщених на його поверхні.

Зменшення кількості рядків і стовпців матриці за рахунок її багатошарового виконання дозволяє при одному і тому ж розмірі комутатора збільшити кількість входів і виходів або мінімізувати площу, яку він займає. Це може значно підвищити щільність комутаційних з'єднань і спростити технологію виготовлення так званих макетних плат, що важливо при великій номенклатурі малосерійних виробів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафики. – М.: Связь, 1979. – 224 с.
2. Зелигер Н.Б., Чугреев О.С., Яновский Г.Г. Проектирование сетей и системы передачи дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.
3. Дудко А.А. Неблокирующие коммутационные схемы. – М.: ВЦ АН СССР, 1990. – 68 с.
4. Харитонов В.Х. Мультисервисная сеть и методы коммутации // Электросвязь. – 2004.– № 1. – С. 17–22.
5. Подлазов В.С. Неблокируемость произвольных перестановок на коммутаторе со структурой многомерной решетки // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 8.– С. 178–188.
6. Подлазов В.С. Кросскольца – мультипликативные коммутаторы с малым диаметром и их 1-1-перестраиваемость // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 4. – С. 153–165.
7. Назаров А.Н. Методы выбора аппаратурно-программных средств для синтеза микропроцессорного коммутационного модуля АТМ коммутатора многокаскадной архитектуры по критерию реального времени // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 3.– С. 114–123.
8. Jacob Andrew R. A survey of fast packet switches // Comput. Commun Rev. – 1990. – Vol. 20, N 1. – P. 54–64.
9. Пат. 6525650, США МПК H 04 Q 5/22. Electronic switching matrix: Пат. 6525650, США МПК H 04 Q 5/22 (США); TRW Inc./Chan Steven S., Hoyoshibaro George M., Chen Chun-Hong Horry, Lin Pavie C. – № 09/330335; Заявл. 11.06.99; Опубл. 25.02.03; НПК 340/14. – С. 69.
10. Nakagawa Ikuo, Dsaki Hiroshi, Kikuchi Yutaka, Nagami Kenichi. Design of next generation IX using MPLS technology//Joho shori gakkai ronbunshi=Trans. Jnform. Process. Sac. Jap. – 2002. – Vol. 43, N 11. – P. 3280–3290.
11. Kameda Yoshio, Yorozu Shinichi, Terai Hirotaka, Fujimaki Akira High-speed operation of a singlequantum (SFQ) cross/bar switch up to 35 GHz // Jap. J. Appl. Phys. Pt. I. – 2003. – Vol. 42, N 48.– P. 2163–2166.

12. Разработка шведской фирмы CONTRAVES в области монтажных соединений // Новости науки и техники. Сер. Электронизация производства: Реферативный сборник. – М.: ВИНИТИ. – 1990. – Вып. 10. – С. 10–12.
13. Jajszczyk A. A dynamic programming approach to optimization of switching networks composed of digital switching matrices // IEE Trans. Commun. – 1987.– Vol. 35, N 12. – P.1342–1346.
14. Тимофеева Н.К. Матрицы в задачах комбинаторной оптимизации // Проблемы управления и информатики. – 1996. – № 3. – С. 104–113.
15. Тимофеева Н.К. Упорядочение множества значений аргумента целевой функции в комбинаторной оптимизации // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 6. – С. 78–88.
16. Некрасов Д.М., Тимофеева Н.К. Координатный коммутатор / Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины. – К., 1993. –23 с. – Деп. в ВИНИТИ 07.06.93, N 1550–В93.
17. Координатний комутатор: Україна, МКИ НО4 Q 3/52 / Д.М. Некрасов, Н.К. Тимофієва. – № 94051272; Заявл. 29.06.93; Опубл. 29.12.94. Бюл. № 18–1. – С. 2–105.