

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

УДК 681.324

Г. Л. Лисенко, доц., к. т. н.;

С. Є. Тужанський;

Осама Ф Ф Абудаїя, асп.

АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ОПТИЧНИХ КОМУТАТОРІВ ДЛЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

Проаналізовано основні характеристики наявних оптичних комутаторів різних архітектур з урахуванням впливу блокувань, а також сучасні технології для їхньої реалізації у високошвидкісних волоконно-оптичних мережах, потенційні можливості, обмеження й особливості. Представлено математичну модель роботи оптичного комутатора в різних режимах завантаження. Запропоновано структурну реалізацію високопродуктивного оптоелектронного комутатора на SEED.

Вступ

Оптичний комутатор (ОК) — один з найважливіших елементів волоконно-оптичної мережі, без якого неможливо будувати масштабовані архітектури. Як оптичні пристрої мультиплексування, працюючи за методом додавання/відгалуження каналів (OADM), вони дозволяють комутувати окремі хвильові канали. У центральній частині загальноміських мереж (MAN) вони виконують роль оптичних крос-з'єднувачів, які здійснюють під'єднання множини вхідних ліній.

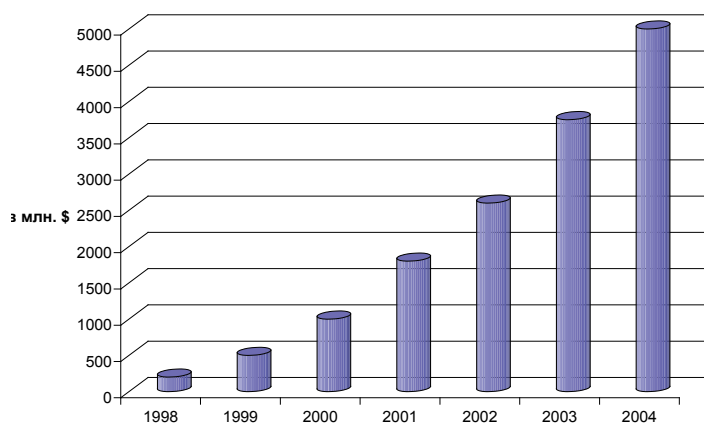


Рис. 1. Ринок оптичних комутаційних систем і технологій

Динаміка зростання сучасного світового ринку оптичних комутаційних технологій показана на рис. 1 [1]. Оскільки 80—90 % сучасного трафіка даних передається від корпоративних мереж через регіональні та загальноміські мережі, то особливо актуальним завданням є розробка високошвидкісних масштабованих оптичних крос-з'єднувачів для MAN.

Найвідомішими типами волоконно-оптичних комутаторів є спрямовані відгалужувачі, мостовий балансовий інтерферометр і комутатор на перехресних хвилеводах [2]. В основі роботи ОК

може використовуватися лінійний електрооптичний ефект Погкельса, акустооптичний, термооптичний ефекти та ін. [1, 2].

Існує ряд технічних реалізацій просторових комутаторів 2×2 на основі напівпровідникових оптичних підсилювачів. Опис та аналіз роботи таких пристроїв, а також похідних комутувальних пристроїв наведені в роботах [2, 3].

Комутатори для крос-з'єднань у волоконно-оптичних мережах розділяють на прозорі й непрозорі. У прозорих комутаторах перетворення оптичного сигналу в електричну форму не відбувається, максимальна кількість портів приблизно 4000. Однак використання перетворення оптичного сигналу в електричну форму в непрозорих комутаторах, щільність портів у яких сьогодні до 1024, дозволяє поліпшити керування мережею й забезпечує можливість регенерації сигналів.

Порівняльні характеристики комутаторів різних архітектур

Найпоширеніші дві архітектури оптичних крос-з'єднувачів (просторових комутаторів): транспозиційні й загального типу. Транспозиційні комутатори складаються із з'єднань типу «один-один» між різними портами. З'єднання типу «один-множина» неможливі; повна кількість з'єднань визначається сумарною кількістю попарних комбінацій кінцевих точок. У комутаторах загального типу можливий будь-який тип з'єднання: «один-один», «один-множина» й «множина-один». У результаті кількість різних можливих варіантів з'єднання збільшується. Подальшим кроком є спеціальні LDC комутатори, які називають лінійними дільниками-об'єднувачами. Вони дозволяють телефонним компаніям розподіляти вхідну потужність між вихідними портами для забезпечення поліпшених характеристик загасання [3].

Крім того, комутатори загального типу й LDC не можуть не випускати сигнал назовні, тоді як у випадку транспозиційних комутаторів це можливо. Тому мережі з транспозиційними комутаторами можуть бути сильно заплутаними, у випадку мереж із хвильовим мультиплексуванням (WDM та DWDM) для деяких каналів замкнені маршрути здатні утворювати кільця. У випадку виникнення кілець накопичуються й дуже швидко зростають шуми, які можуть інтерферувати з іншими хвильовими каналами або відбирати в них потужність.

Один з підходів до створення оптичних комутаторів лежить у використанні координатних (матричних) комутаторів з архітектурою Клоза, яка у випадку транспозиційних комутаторів може бути введена в структуру Бенеша [1—3].

Забезпечення з'єднань одночасно для всіх портів характеризується властивостями блокування оптичних комутаторів. Однак крім фактора блокування для оцінки експлуатаційних характеристик технології комутації необхідно враховувати розмірність комутаційної матриці, масштабованість, структурованість, швидкість роботи комутаційних засобів і втрати.

На рис. 2а показаний строго неблокувальний комутатор, 4×4 з 16 елементами, який представляє окремий випадок матричного комутатора $n \times n$. Особливістю роботи такого комутатора є те, що після проходження кожного елемента втрачається частина потужності корисного сигналу, вноситься шум, і тому у відповідно нерівному стані виявляються різні шляхи. З'єднання між будь-яким вхідним і вихідним полюсом завжди можна встановити незалежно від того, як комутуються інші пари полюсів, тобто не впливаючи на їхнє з'єднання.

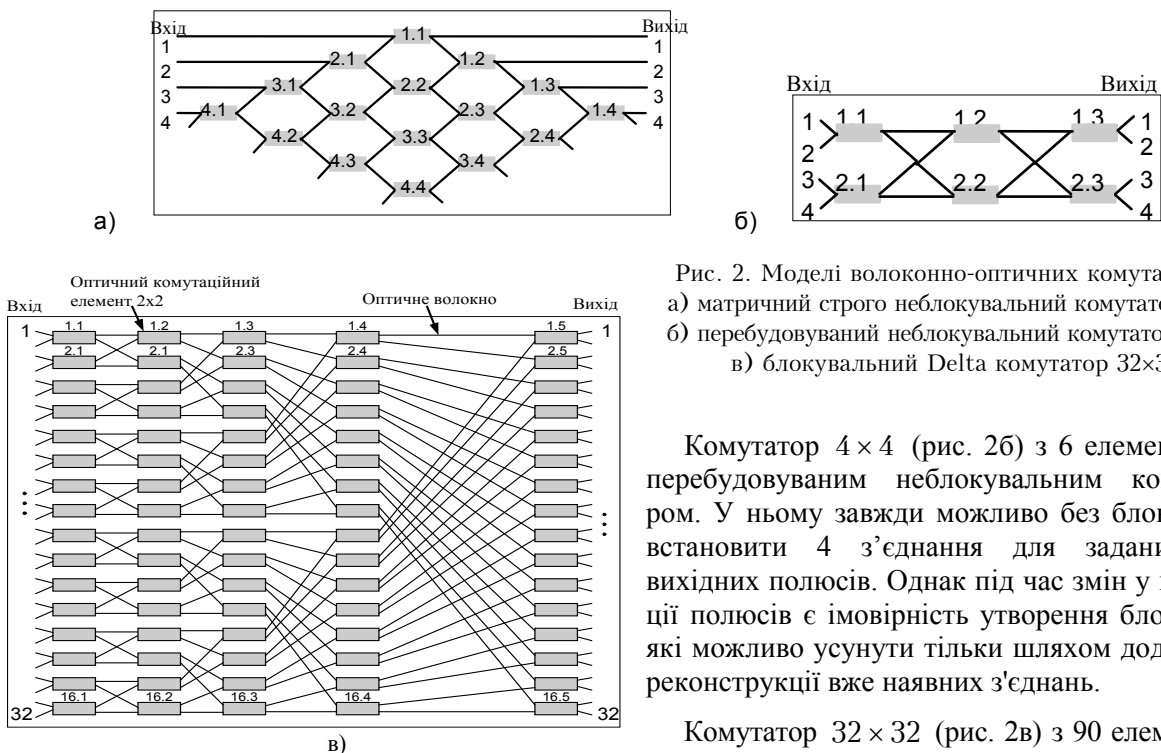


Рис. 2. Моделі волоконно-оптичних комутаторів:
 а) матричний строго неблокувальний комутатор 4×4 ;
 б) перебудований неблокувальний комутатор, 4×4 ;
 в) блокувальний Delta комутатор 32×32

Комутатор 4×4 (рис. 2б) з 6 елементами є перебудованим неблокувальним комутатором. У ньому завжди можливо без блокування встановити 4 з'єднання для заданих пар вихідних полюсів. Однак під час змін у комутації полюсів є імовірність утворення блокувань, які можливо усунути тільки шляхом додаткової реконструкції вже наявних з'єднань.

Комутатор 32×32 (рис. 2в) з 90 елементами є блокуючим комутатором типу Delta.

У цьому комутаторі можна встановити з'єднання між будь-яким вхідним і вихідним полюсами. Однак у випадку спроби встановлення множинних з'єднань можуть виникати блокування, які в

принципі неможливо усунути. Властивість строгого неблокування вважається однією з найважливіших в оптичній комутації. Це пов'язано з тим, що процедура запобігання блокуванню через попереду розміщення в буфері комірки або кадру (як у традиційних системах електронної комутації), досить складна в повністю оптичних мережах [3].

З цих причин матричний комутатор є одним з найефективніших для створення оптичних комутаторів з невеликою кількістю портів [2]. Недоліком такої структури є суттєве збільшення значень повної кількості елементів n_C і максимальної кількості елементів на шляху між вхідним і вихідним полюсами n_L зі зростанням кількості вхідних полюсів n $n_C = n^2$ і $n_L = 2n - 1$.

Серед блокувальних комутаторів найвідомішими є три альтернативних типи: *Delta* $D_{n,2}$, *Banyan* $Y_{n,2}$ й *Omega* $\Omega_{n,2}$ [2]. Аналіз цих типів комутаторів показує, що вони мають однакові гранично низькі значення параметрів n_C і n_L серед блокувальних комутаторів $n \times n$ (табл. 1), що забезпечує їм порівняно низьку собівартість. Ефективність блокувальних комутаторів різко падає зі зростанням кількості вхідних каналів.

Таблиця 1

Характеристики оптичних комутаторів

Назва комутатора	Тип комутації	Повна кількість елементів, n_C	Максимальна кількість елементів шляху, n_L	Вартість устаткування	Складність алгоритму з'єднання	Ступінь впливу на наявні з'єднання
Delta	блокувальний	$0,5 n \log_2 n$	$\log_2 n$	Низька	Низька	Низька
Banyan	блокувальний	$0,5 n \log_2 n$	$\log_2 n$			
Omega	блокувальний	$0,5 n \log_2 n$	$\log_2 n$			
Batcher+Banyan	неблокувальний, перебудовуваний	$\frac{n}{4} \log_2 n (3 + \log_2 n)$	$\frac{1}{2} \log_2 n (3 + \log_2 n)$	Низька	Висока	Висока
Benes	неблокувальний, перебудовуваний	$\frac{n}{2} (2 \log_2 n - 1)$	$2 \log_2 n - 1$			
Cantor	строго неблокувальний	$n (\log_2 n^2) + \frac{3n}{2} (\log_2 n - 2n)$	$2 \log_2 (\log_2 n) + \log_2 n$	Висока	Низька	Низька
Crossbar	строго неблокувальний	n^2	$2n - 1$			

Примітка: n — кількість вхідних/вихідних полюсів (2 характеризує тип елемента — 2×2)

Під час використання перебудовуваних неблокувальних комутаторів можна зустрітися із ситуацією, коли для задоволення чергового запиту на установа п певного з'єднання може знадобитися перебудова внутрішньої структури інших з'єднань.

Комутатори LDC і комутатори загального типу використовують подібні архітектури. Комутатори загального типу використовують координатну схему, але кількість комутувальних елементів у них більша, оскільки вони здатні підтримувати складніші з'єднання, ніж «один-один». У той же час, координатним комутаторам властиве послаблення сигналів, що відбувається на кожному з етапів процесів розділення й об'єднання сигналів. В LDC із цією проблемою вдається впоратися за рахунок введення енергетично керованого розділення й об'єднання сигналів [3].

Аналіз технологій оптичних комутаторів

Для створення комутувальних елементів в сучасних оптичних мережах застосовують ряд технологій: електромеханічні системи з мікродзеркалами (MEMs), оптомеханічна, термооптична, бульбашкова, рідиннокристалічна та акустооптична комутація, електроголографічні та електрично комутовані ґратки Бреґґа (ESBGs), пристрої на самообмеженому електрооптичному ефекті (SEED) та ін.[5—10].

Порівняльний аналіз перерахованих вище технологій комутації для високошвидкісних волоконно-оптичних мереж подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики сучасних технологій комутації

Технологія комутації	Розмірність матриці	Масштабованість	Швидкість комутації	Втрати, дБ	Особливості	Література
MEMs	64×64	Низька	1...10 мс	6	Різка погіршення надійності з ростом розмірності	[1,3,8]
Оптомеханічна	н/д	Низька	10...50 мс	3...5	Низька надійність, високі вимоги до точності пересування портів, а також до виробництва	[1, 2]
Електрооптична	2×2	Низька	>1 мкс	1...3	Складності масштабування	[1—3]
Термооптична	2×2	Низька	н/д	н/д	Залежність від довжини хвилі, температурний контроль	[1, 3]
Бульбашкова	16×32	Висока	0,5...1 мс	н/д	Надійність, температурний контроль, складність виготовлення > 100 портів	[1, 7]
Рідинно-кристалічна	2×2	Невисока	~5 мс	н/д	Надійність, низьке енергоспоживання, температурний контроль кристала	[3]
Електроголографічна	н/д	Висока	>10 мкс	>1	Надійність, підвищене енергоспоживання	[3]
ESBGs	32×32	Висока	~100 мкс	1	Надійність, споживана потужність ~50 мВт	[3, 9]
Акустооптична	н/д	Потенційно висока	0,5...10 мкс	н/д	Висока надійність	[1, 3]
SEED	256×256	Висока	30...50 нс	1...5	Можливість як електричного, так й оптичного керування	[14, 15]

Швидкодія перемикання комутаторів для сучасних високошвидкісних волоконно-оптичних мереж (SONET, Gigabit Ethernet та ін.) становить одиниці мілісекунд. З урахуванням швидкостей передачі даних, що постійно зростають, і розвитку систем комутації в напрямку перемикання

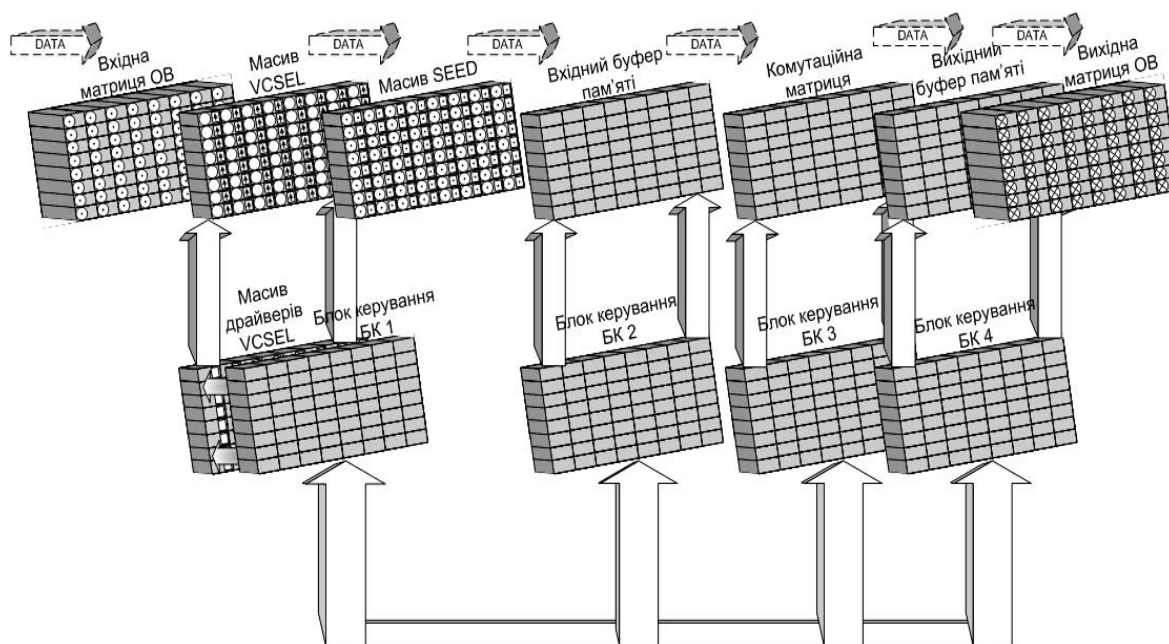


Рис. 3. Високопродуктивний оптоелектронний комутатор на SEED

окремих пакетів оптичними засобами, потенційний час комутації в найближчому майбутньому повинен бути в межах одиниць або десятків наносекунд. Отримати такі значення у системах, що використовують опто-електронне й зворотнє електронно-оптичне перетворення, дуже складно. Реалізовані на MEMs фотонні системи (фірм Lucent, Nortel та ін.) внаслідок інерційності мікродзеркал не забезпечують високу швидкість перемикання, хоча й успішно працюють з гігабітними потоками у встановлених режимах [7—10].

Одна зі структурних реалізацій високопродуктивного оптоелектронного комутатора для паралельних волоконно-оптичних мереж з використанням SEED представлена на рис. 3. Схема працює в такий спосіб. Паралельний оптичний потік даних надходить на вхідну матрицю оптичних волокон ОВ. Вхідний інтерфейс здійснює оптичне керування процесом проходження сигналів, яке відбувається за допомогою масиву вертикально випромінювальних лазерів VCSEL. Потік даних, пройшовши паралельно через матрицю VCSEL, надходить на масив SEED, що виконує функцію пропускання або блокування даних, які надходять із вхідної матриці ОВ. Далі потік даних передається в оптичний вхідний буфер пам'яті, і за наявності вільних входів на комутаційній матриці надходить на неї. Після проходження через комутаційну матрицю скомутований паралельний потік даних передається на вихідний буфер пам'яті, який за наявності вільних портів на вихідній матриці ОВ здійснює передачу за межі комутатора.

Запропонована схема може бути використана для організації локальних мереж суперкомп'ютерів. Реалізовані в цей час паралельні інтерфейси введення/виведення інформації (HIPPI, Optobuse) на основі спеціалізованих багато процесорних систем дозволяють здійснювати роботу із двовимірними масивами даних (32×32 і більше) зі швидкостями до 1 Гбіт/с на один канал [11, 12].

Моделювання роботи оптичного комутатора в різних режимах завантаження

Одним із способів підвищення загальної швидкодії пристрою комутації, призначеного для паралельного передавання великих масивів даних, є збільшення розмірів операційного поля. Швидкодію високопродуктивного комутатора (кількість операцій в секунду) в залежності від розмірів операційного поля можна розрахувати за формулою [13]:

$$\gamma = (n \times n) I N_0 N_d^2 f, \quad (1)$$

де $(n \times n)$ — розмір локальної області обробки (операційне поле); I — число команд, які виконуються на елемент даних;

N_0 — число операцій на алгоритм; N_d — розмір даних; f — швидкість передачі пакетів у пристрої.

Для зображеного на рис. 3 комутатора теоретичну залежність підвищення загальної швидкодії пристрою для стандарту *Gigabit Ethernet* в процесі паралельного передавання в залежності від розмірів операційного поля показано на рис. 4.

В реальних системах кількість елементів операційного поля обмежується рядом факторів (розмір буферної пам'яті, складність системи керування, оптичний

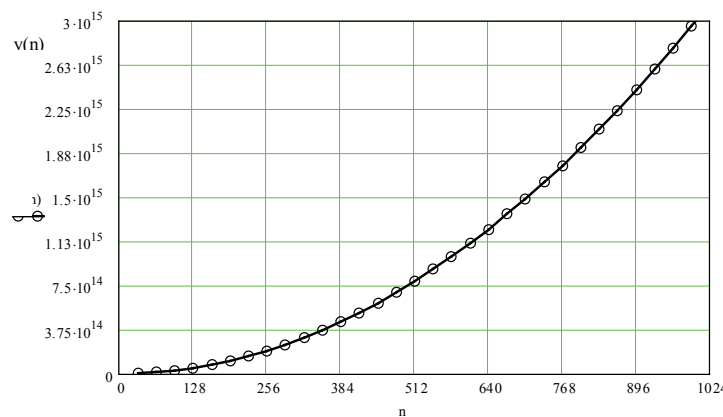


Рис. 4. Залежність швидкодії комутатора від розмірів операційного поля ($I = 1$, $N_d = N_o = 1$, $f = 10^9$)

інтерфейс тощо.) [3, 4].

В процесі проходження пакетів через оптичний комутатор (у тому числі й зображений на рис. 3) важливим фактором є його здатність організувати комутацію з мінімальними затримками для різної кількості вхідних і вихідних портів. У випадку одночасної передачі з декількох вхідних портів на один вихідний у буферній пам'яті утворюються черги. Розмір черги залежить від інтенсивності надходження даних, а ефективність роботи пристрою може бути оцінено на основі теорії масового обслуговування [13]. В цілому ж збільшується кількість і складність обчислювальних операцій, змінюється фактична пропускна здатність

$$P_{pr} = \frac{P}{w_{cp}}, \tag{2}$$

де P – номінальна пропускна здатність;

w_{cp} – комбінаторна складність операцій, що виконуються над потоком даних.

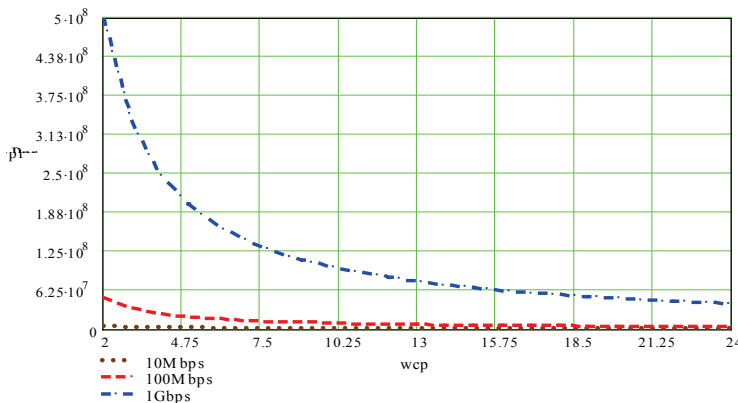


Рис. 5. Фактична пропускна здатність комутатора P_{pr}

в залежності від комбінаторної складності операцій w_{cp} для стандартів передачі Ethernet, Fast Ethernet та Gigabit Ethernet

введемо функцію залежності ймовірності передачі пакета від пропущених тактів:

$$P_C = kP_k + \sum_{i=0}^{k-1} (i+1)P_i, \tag{3}$$

де k — максимальна кількість пропущених тактів;

P_k — ймовірність втрати пакета через k тактів (рис. 6)

Номінальна швидкодія комутатора [4]:

$$V_{NS} = \frac{1}{\tau}, \tag{4}$$

де τ — довжина робочого такту.

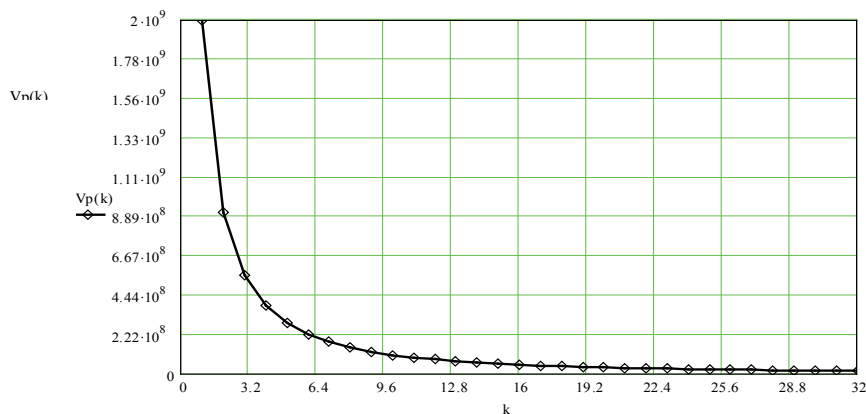


Рис. 6. Функція залежності швидкодії комутатора від кількості пропущених тактів

Таким чином реальна швидкодія оптоелектронного комутатора з урахуванням можливих втрат пакетів

$$V_P = \frac{1}{\tau \left(kP_k + \sum_{i=0}^{k-1} (i+1) P_i \right)}. \tag{5}$$

Очевидно, що у випадку природного руху кадрів у комутаторі швидкодія комутатора є максимальною. Якщо ж у пристрої виконуються операції зсуву, на кожному з них комутатор

буде витрачати один робочий такт. Загальна кількість таких операцій істотно впливатиме на швидкодію комутатора, обмежуючи максимальну розмірність матриці входів / виходів.

Таким чином, обчислювальна потужність комутатора визначається кількістю машинних операцій, які виконуються за одиницю часу [13]:

$$P = \frac{P_3}{K_G}, \quad (6)$$

де P — обчислювальна потужність комутатора, $P_3 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i w_i}{T}$ — обчислювальна потужність задачі,

K_G — коефіцієнт використання обчислювальної потужності комутатора, k — кількість різних операцій оброблення, n_i — кількість операцій одного виду, T — час розв'язання задачі (рис. 7).

Таким чином, вказані вище чинники істотно обмежують швидкодію та пропускну здат-

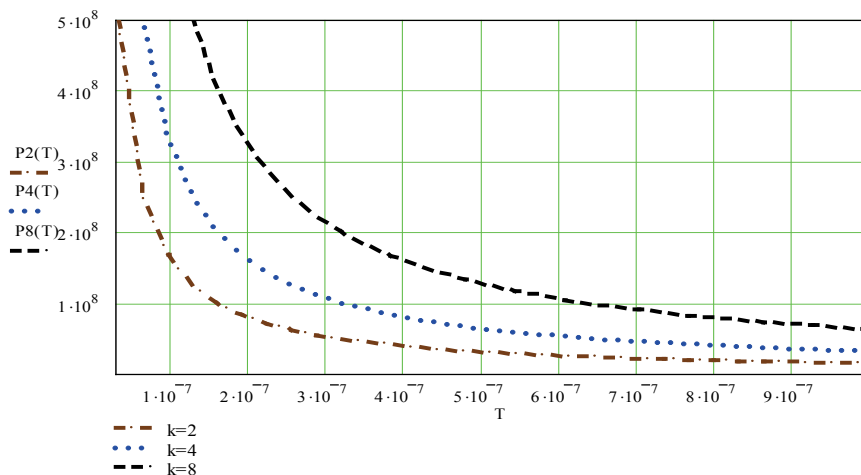


Рис. 7. Функція обчислюваної потужності комутатора в залежності від часу розв'язання задачі для різної кількості операцій оброблення (2, 4 та 8)

ність оптичного комутатора. Відповідні максимальні розміри операційного поля для паралельного передавання повинні бути узгоджені із комбінаторною складністю операцій оброблення, їх максимальною кількістю, впливом буферизації.

Висновки

Наявні сучасні технології оптичної комутації сигналів, зокрема крос-з'єднувачів, не дозволяють одержувати високі швидкості комутації під час перемикання. До кінця не вирішені також проблеми структурованості, масштабованості, підвищення продуктивності й надійності таких мереж. Високопродуктивний оптоелектронний комутатор на SEED має потенційно високі можливості для забезпечення наносекундних швидкостей комутації, низьких втрат і помірного енергоспоживання. Основною перевагою роботи пристрою є можливість комутації без опто-електронних й електронно-оптичних перетворень, що дозволяє максимально використати смугу пропускання оптичного волокна та одержати найвищу продуктивність, а також висока швидкість перемикання. Загальна потенційна пропускну здатність оптоелектронних комутаторів, що використовують інтегровані SEED-технології у перспективі може перевищити 20 Тбіт/с, кількість входів / виходів — 50000 [15].

Під час моделювання роботи оптичного комутатора враховується залежність його пропускну здатності, швидкодії й продуктивності від ступеня завантаження пристрою. Максимальні значення кількості пропущених тактів, операцій оброблення та їх комбінаторна складність обмежують максимальні розміри операційного поля і повинні враховуватись під час аналізу динаміки роботи пристрою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Regis J. «Bud» Bates. Optical Switching and Networking Handbook. McGraw-Hill Company, 2001. — P. 321.
2. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 1998. — 267 с.
3. Гринфилд Дэвид. Оптические сети. — К.: ООО «ТИД» «ДС», 2002. — 256 с.

4. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. — СПб: Питер, 1999. — 672 с.
5. Иванов А. Б. Волоконная оптика. — М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. — 671 с.
6. Семенов А. Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. — М.: КомпьютерПресс, 1998. — 302 с.
7. <http://www.agilent.com>
8. <http://www.lucent.com>
9. <http://www.digilens.com>
10. <http://www.alcatel.com>
11. Patent № 5,345,563. US. Input/output interface for data in parallel processors. / Christoph Uihlein; Michael Hausing; Andreas J. Puhler. Sep. 6, 1994
12. OPTOBUS Data Sheet, Logic Integrated Circuits Division, Motorola Inc., Chandler, Ariz. 85248, 1995.
13. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания. — М.: Высшая школа, 1982.
14. M. B. Yairi, H. V. Demir, D. A. B. Miller. Optically controlled optical gate with an optoelectronic dual diode structure — theory and experiment // Optical and Quantum Electronics. Special Issue on Components for Ultrafast Communications. — September, 2001. — Vol. 33. — P. 1035—1054.
15. Terabit optical local area networks for multiprocessing systems. T. H. Szymanski, A. Au, M. Lafrenie` re-Roula, V. Tuan, B. Supmonchai, J. Wong, B. Zerrouk, and S. T. Obenaus // Applied Optics. — January, 10, 1998. — Vol. 37. — No. 2. — P. 264—275.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптоелектронної техніки

Надійшла до редакції 10.02.05
Рекомендована до друку 28.02.05.

Лисенко Геннадій Леонідович — доцент, *Тужанський Станіслав Євгенович* — асистент, *Осама Ф Ф Абудайя* — аспірант.

Кафедра лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет