

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 621.395.74

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18

## Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объемов данных<sup>\*</sup>

Е.А. БАРАБАНОВА

414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева 16, Астраханский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: elizaveta-alex@yandex.ru

Существующие оптические коммутационные системы строятся на основе ячеек  $2 \times 2$ , к таким схемам можно отнести схемы Бенеша, Шпанке и Шпанке–Бенеша. Они обладают низкой масштабируемостью и при большом числе входов имеют низкую надежность и низкое быстродействие. В работе предлагается новая схема оптической двухкаскадной коммутационной системы на 256 входов и 256 выходов для волоконно-оптических систем связи. Коммутационная система является неблокируемой и полнодоступной. Принципиальным отличием предлагаемой коммутационной системы от существующих является новая схема построения, а также то, что в ее основе лежат новые оптические коммутационные ячейки, имеющие 4 входа и 4 выхода. Оптические коммутационные ячейки объединены в коммутационные блоки размерностью 16 входов и 16 выходов каждый. Проведено сравнение значений структурных характеристик существующих коммутационных схем оптических коммутаторов и предлагаемой двухкаскадной коммутационной системы. Показано, что предлагаемая схема обладает значительно меньшей сложностью и содержит значительно меньшее число каскадов, а значит, обладает более высокой надежностью и быстродействием. В предлагаемой оптической двухкаскадной системе коммутации реализуется децентрализованный способ управления, для этого предлагается использовать принцип частотного разделения управляющей и информационной волны. Для управления информационной волной в структуре коммутационной ячейки предусмотрены управляющие устройства: фильтр Брэгга, частотный детектор и формирователь управляющего сигнала. Такой способ управления позволяет повысить скорость коммутации, так как процесс управления происходит в самих коммутационных ячейках и не требует частого обращения к процессору.

**Ключевые слова:** оптическая коммутационная система, ячейка коммутации, коммутационный блок, каскады, фильтр Брэгга, буферное устройство, линия задержки, длина волны

## ВВЕДЕНИЕ

Оптический коммутатор является одним из основных элементов полностью оптической системы связи. От быстродействия этого элемента зависит пропускная способность всей волоконно-оптической системы в целом [1].

---

<sup>\*</sup> Статья получена 24 сентября 2017 г.

Важным требованием к построению оптических коммутаторов является обязательное свойство строгой неблокируемости, так как алгоритмы работы блокируемых схем предусматривают процесс переустановления существующих соединений, в результате чего требуется предварительная буферизация информации и усложняется процесс управления. В то же время реализация буфера в оптических коммутаторах – достаточно сложная задача. В свою очередь, неблокируемые схемы обладают существенным недостатком: для их построения требуется большое число элементов и каскадов, что влияет на надежность и быстродействие таких систем [2].

Поэтому задача разработки новых схем оптических коммутаторов, использование которых позволит повысить пропускную способность и надежность волоконно-оптической системы связи, является актуальной.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На сегодняшний день различают следующие основные схемы построения строго неблокируемых коммутационных систем: матричная схема и трехкаскадная схема Клоза [3].

Матричная схема построения оптического коммутатора является наиболее простой, но в то же время при большом числе входов сложность построения такого коммутатора значительно возрастает. Поэтому данная схема не представляется перспективной при разработке оптических коммутаторов, предназначенных для передачи больших объемов данных.

Трехкаскадная схема Клоза представляет собой архитектуру, состоящую из трех звеньев коммутационных блоков размером  $n \times m$ , при построении которой учитывается правило строгой неблокируемости:  $m = 2n - 1$ , где  $n$  – число входов в коммутационный блок входного каскада, а  $m$  – число выходов из коммутационного блока входного каскада [4]. Такая архитектура используется для построения коммутаторов с числом входов больше, чем 64, и требует меньшего числа коммутационных элементов для построения по сравнению с матричными коммутаторами. Но схема Клоза не является перспективной для построения полностью оптических коммутаторов, так как она имеет преимущества перед другими схемами при использовании коммутационных блоков на число входов и выходов более двух. В то же время размерность большинства существующих в настоящее время оптических ячеек коммутации либо ограничена двумя входами и двумя выходами, либо они работают только как вентили или имеют один вход и несколько выходов [5].

Для построения оптических коммутационных систем кроме матричных коммутаторов используются схемы, построенные на базовых элементах (БЭ) с двумя входами и двумя выходами  $2 \times 2$ . К таким схемам относят схемы Бенеша, схемы Шпанке и схемы Шпанке–Бенеша [2]. Недостатком данных схем является низкая масштабируемость и большое затухание оптического сигнала, так как при увеличении числа входов возрастает число каскадов и соответственно длина соединительного пути. В противном случае такие схемы не будут являться строго неблокируемыми, и для их работы должны использоваться алгоритмы перестроения.

Можно предположить, что устранение отмеченных недостатков возможно в результате разработки принципиально новой схемы коммутационной системы.

Еще одной задачей, решаемой разработчиками коммутационных систем, является выбор системы управления.

Существующие электронные коммутационные системы используют два способа управления: децентрализованный и централизованный. Коммутационные системы, использующие первый способ управления, называют также схемами с самонастройкой. При централизованной настройке управляющая информация поступает в специальное единое для всей системы центральное устройство управления, которое вырабатывает управляющие сигналы для отдельных коммутационных элементов. В случае децентрализованной настройки каждый коммутационный элемент снабжен своим собственным локальным устройством управления, а единое центральное устройство управления отсутствует. В системе с децентрализованным управлением настроечная информация поступает на вход коммутационной системы и передается от одного коммутационного элемента к другому. Анализируя настроечную информацию, локальное устройство управления устанавливает коммутационный элемент в состояние «включено» или «выключено» [6].

Большинство существующих оптических систем коммутации используют принцип централизованного управления. При этом заголовок оптического пакета преобразуется в электрический сигнал, который поступает на устройство управления. Устройство управления, в свою очередь, обрабатывает управляющий сигнал и настраивает в соответствии с ним элементы коммутационной системы. Оценивая быстродействие коммутационной системы, учитывают скорость подачи управляющих сигналов и скорость реакции на эти сигналы. Быстродействие существующих ячеек коммутации составляет  $10^{-12}$  с [7], а сигналы управления можно подавать со скоростью порядка  $10^{-10}$  с [8, 9]. Следовательно, фактором, ограничивающим быстродействие оптических коммутационных систем, является частота процессора, и результирующая скорость коммутации составит  $10^{-10}$  с.

Задачей данной работы является разработка принципиально новой неблокируемой коммутационной системы с меньшим числом каскадов. Эта задача может быть решена, если в качестве БЭ использовать коммутационную ячейку с четырьмя входами и четырьмя выходами вместо существующих  $2 \times 2$  ячеек.

Кроме этого, предлагается разработка элементов оптической коммутационной системы, процесс настройки которых происходил бы за счет дополнительных управляющих элементов, размещенных внутри самих элементов. Для этого в данной работе предлагается использовать принцип частотного разделения управляющего и информационного сигналов [10].

## 2. СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

Принцип частотного разделения управляющего и информационного сигналов реализуется в предлагаемой оптической коммутационной ячейке на 4 входа и 4 выхода. Ячейка состоит из буферного устройства и элемента коммутации. Входной оптический сигнал, состоящий из управляющего сигнала, передаваемого на длине волны  $\lambda_c$ , и информационного сигнала, передаваемого на длине волны  $\lambda_i$ , поступает на фильтр Брэгга (ФБ) элемента коммутации. В фильтре Брэгга происходит разделение направления оптических сигналов:

управляющий сигнал поступает на частотный детектор (ЧД), а информационный сигнал поступает на отклоняющую систему (ОС). Отклоняющая система представляет собой фотонный кристалл. Принцип действия отклоняющей системы описан в работе [11]. Методика расчета коэффициентов отражения и поглощения волны в анизотропной среде рассмотрена в [12, 13]. Частотный детектор преобразует частоту управляющего сигнала в его амплитуду. При этом используется линейный участок АЧХ частотного детектора.

Амплитудно-модулированный оптический сигнал с частотного детектора поступает на формирователь оптического сигнала (ФУС), где происходит преобразование амплитуды оптической волны в управляющее напряжение. Четыре значения напряжения определяют четыре режима работы ОС, а значит, информационный сигнал может быть направлен на один из четырех выходов. Так как вход в элемент коммутации один, а число входов в саму ячейку коммутации четыре, то необходимо предусмотреть в схеме ячейки буферное устройство. Оно состоит из линий задержки (ЛЗ), по одной на каждый вход, управляемых оптическим интегральным устройством (ОИУ), включающим оптический трансформатор, мультиплексор и устройство, переключающее входы ОИУ. Каждая из четырех линий задержки подключена ко входу ОИУ. Если на один из входов оптической ячейки поступил оптический сигнал, то сигналы на трех других входах задерживаются в ЛЗ и на вход ОИУ не поступают.

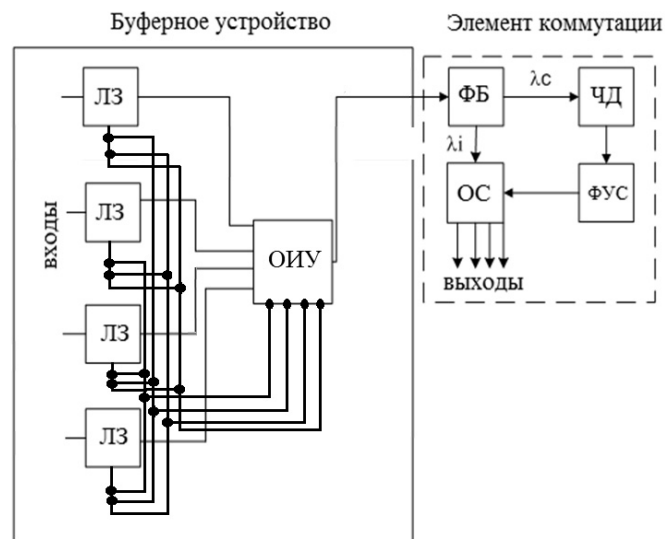


Рис. 1. Структурная схема оптической ячейки коммутации

Далее сигнал поступает на вход элемента коммутации, где в зависимости от значения управляющего напряжения он будет передан на один из четырех выходов ячейки.

### 3. КОММУТАЦИОННЫЙ БЛОК ПЕРВОГО УРОВНЯ

На представленных оптических коммутационных ячейках  $4 \times 4$  строится коммутационный блок первого уровня. Он состоит из двух каскадов входных и выходных ячеек, каждый из которых включает в себя по четыре оптических

ячейки. Схема соединения входных и выходных ячеек блока представлена на рис. 2.

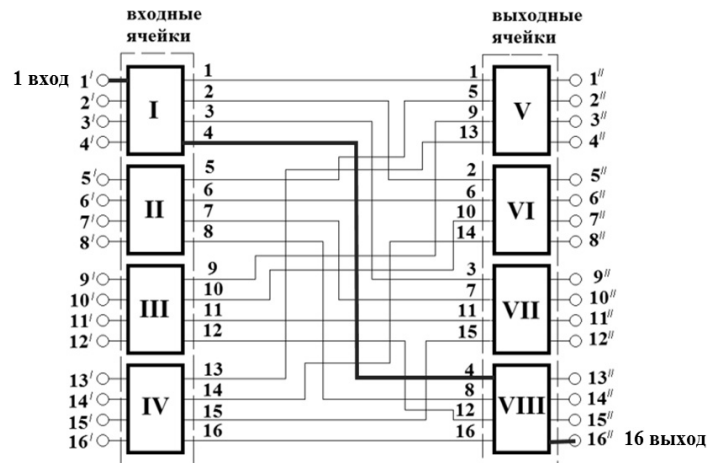


Рис. 2. Структурная схема оптического коммутационного блока первого уровня

Коммутационный блок имеет 16 входов и 16 выходов.

Схема коммутационного блока является полноступенчатой. Любой вход коммутационного блока может быть соединен с любым его выходом. Для этого первый выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки V выходного каскада; второй выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки VI выходного каскада; третий выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки VII выходного каскада; четвертый выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки VIII выходного каскада. Аналогично соединены выходы остальных ячеек с II по IV входного каскада со входами ячеек V–VIII выходного каскада.

Например, при необходимости передать сигнал с первого входа коммутационного блока на 16-й выход, сигнал с первого входа коммутационной ячейки I поступит на четвертый ее выход, затем будет передан на первый вход коммутационной ячейки VIII и далее – на четвертый выход этой ячейки, который одновременно является 16-м выходом коммутационного блока.

#### 4. ОПТИЧЕСКАЯ КОММУТАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА 256 ВХОДОВ И 256 ВЫХОДОВ

Оптическая коммутационная система на 256 входов и 256 выходов состоит из входного и выходного каскадов (рис. 3 и 4), собранных на коммутационных блоках первого уровня (I, II, III, IV), представленных выше. Коммутационные блоки первого уровня каждого каскада объединены в коммутационные блоки второго уровня и обозначаются A, B, C, D. Каждый из коммутационных блоков второго уровня состоит из четырех коммутационных блоков первого уровня. Каждый из коммутационных блоков второго уровня имеет 64 входа и 64 выхода.

На схеме соединений (рис. 3 и 4) указаны входы коммутационной системы, выходы коммутационной системы и межкаскадные соединения.

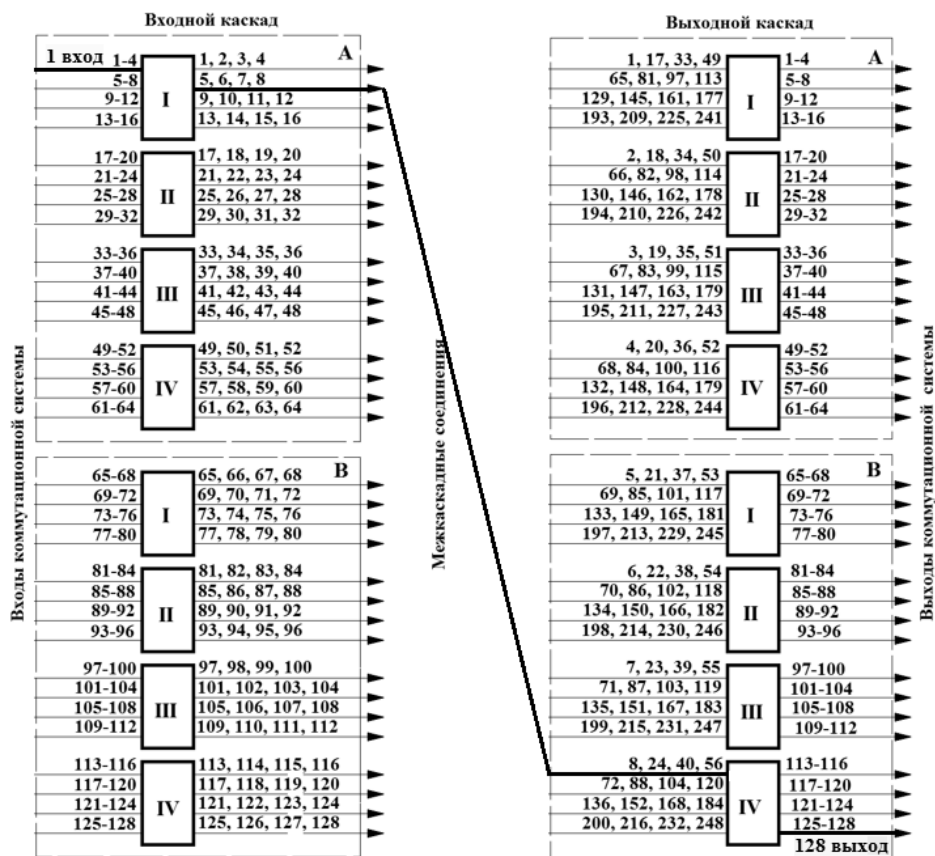


Рис. 3. Коммутационная система (с 1-го по 128-й вход)

Оптическая коммутационная система является симметричной: число входов коммутационной системы равно числу выходов.

Важным свойством оптической коммутационной системы является ее неблокируемость. Система является строго неблокируемой. Это означает, что очередной оптический сигнал может быть передан от заданного входа к заданному незанятому выходу независимо от того, какие соединения установлены к данному моменту времени без их перестроения.

Оптическая коммутационная система является полностью доступной, т. е. любой вход коммутационной системы может быть соединен с любым ее выходом. Для этого первый выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы A; второй выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы A; третий выход коммутационного I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы A; четвертый выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы A.

Пятый выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы B; шестой выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с

первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы В; седьмой выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы В; восьмой выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы В.

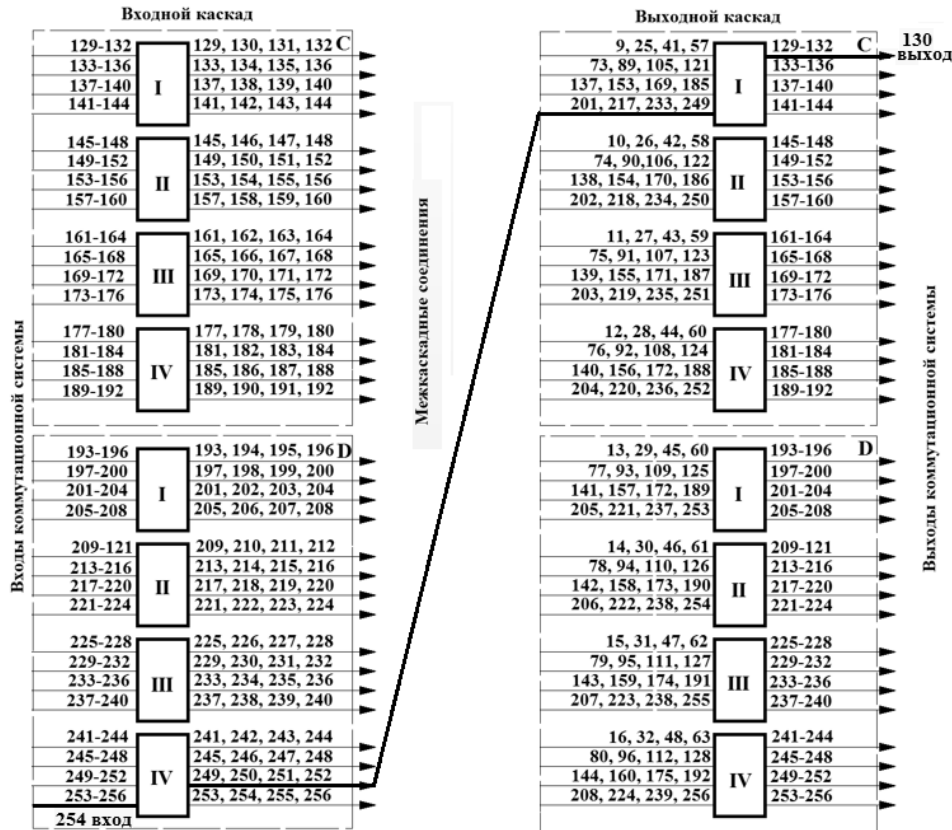


Рис. 4. Коммутационная система (с 129-го по 256-й вход)

Девятый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы С; десятый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы С; одиннадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы С; двенадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы С.

Тринадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы D; четырнадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы D; пятнадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы D; шестнадцатый выход коммутационного блока I

входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы D.

Аналогично соединены выходы остальных коммутационных блоков с II по IV входного каскада группы А, а также выходы коммутационных блоков I–IV входного каскада групп В–D со входами коммутационных блоков с I по IV выходного каскада групп А–D.

Таким образом, при необходимости передать сигнал с первого входа на 128-й выход коммутационной системы вначале сигнал будет передан на восьмой выход коммутационного блока I группы А второго уровня входного каскада; далее сигнал будет передан на первый вход коммутационного блока IV группы В второго уровня выходного каскада, а с первого входа – на 16-й выход данного коммутационного блока, который, в свою очередь, является 128-м выходом коммутационной системы. Аналогично на рис. 4 показан путь прохождения оптического сигнала с 254-го входа на 130-й вход.

Настройка оптической коммутационной системы происходит за два такта. За первый такт происходит процесс коммутации в ячейках входного каскада, за второй такт происходит процесс коммутации оптического сигнала в ячейках выходного каскада.

К основным структурным характеристикам, по которым можно произвести сравнение предлагаемой оптической коммутационной системы и существующих схем коммутации, относятся количество БЭ в коммутационной схеме и число каскадов системы, которое определяет максимальную длину соединительного пути и влияет на скорость коммутации и вероятность блокировки [14].

На основе метода математической индукции получены выражения для нахождения количества БЭ, требуемых для построения предлагаемой оптической системы, а также количества каскадов в коммутационной схеме в зависимости от числа входов.

В таблице представлены структурные характеристики коммутационных схем Бенеша, Шпанке, Шпанке–Бенеша [15] и предлагаемой двухкаскадной схемы.

#### Структурные характеристики коммутационных схем оптических коммутаторов

Наименование коммутационной схемы	Наименование структурной характеристики	
	Количество БЭ $M$	Количество каскадов $R$ в коммутационной схеме
Схема Бенеша	$N(2 \log_2 N - 1) / 2$	$2 \log_2 N - 1$
Схема Шпанке	$2N(N - 1)$	$2 \log_2 N$
Схема Шпанке–Бенеша	$N(N - 1) / 2$	$N$
Схема двухкаскадная	$N / 2$ (при $N \leq 16$ ), $N$ (при $N > 16$ )	$\frac{\log_2 N}{2}$ (при $N \leq 16$ ), $N$ (при $N > 16$ )

На рис. 5 представлены зависимости числа базовых элементов для типовых схем оптических коммутаторов и предлагаемой схемы. На рис. 6 показана зависимость числа каскадов в типовых коммутационных системах и в разработанной системе.



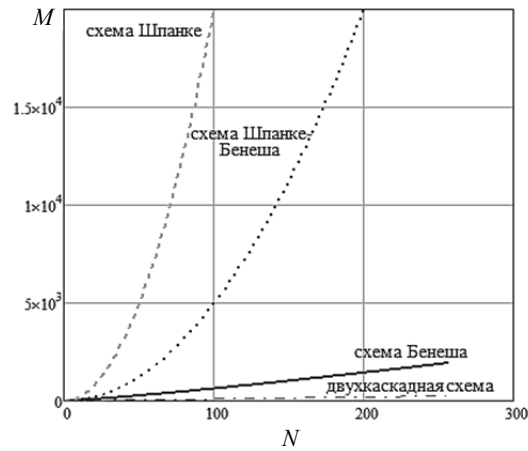


Рис. 5. Зависимости числа базовых элементов  $M$  в коммутационных схемах от числа входов  $N$

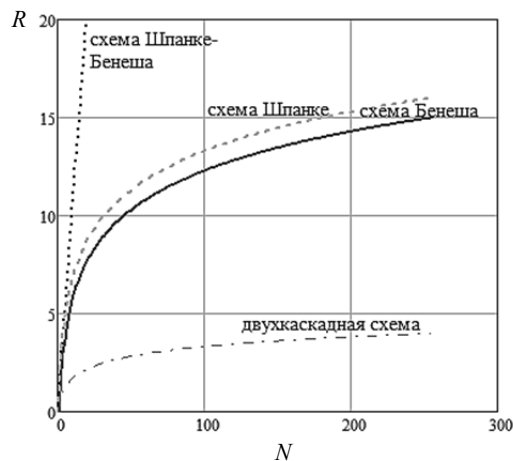


Рис. 6. Зависимости числа каскадов  $R$  в коммутационных схемах от числа входов  $N$

Представленные зависимости дают основание сделать следующие выводы:

- число БЭ, требуемых для построения предлагаемой двухкаскадной коммутационной схемы, значительно меньше числа БЭ, требуемых для построения существующих схем; в частности, при числе входов, равном 256, сложность предлагаемой двухкаскадной схемы будет в 7,5 раза меньше сложности схемы Бенеша, в 510 раз меньше сложности схемы Шпанке и в 128 раз меньше сложности схемы Шпанке–Бенеша;

- количество каскадов в предлагаемой коммутационной системе значительно меньше числа каскадов существующих схем коммутации; в частности, при числе входов, равном 256, число каскадов предлагаемой схемы будет в 4 раза меньше числа каскадов схемы Бенеша и схемы Шпанке и в 64 раза меньше числа каскадов схемы Шпанке–Бенеша.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый тип оптической двухкаскадной коммутационной системы с 256 входами и 256 выходами. Система подразделяется на 4 коммутационных блока второго уровня, каждый из которых включает 4 блока первого уровня. Блоки первого уровня строятся на принципиально новом виде коммутационных ячеек с четырьмя входами и четырьмя выходами.

В работе описан принцип действия коммутационной системы в целом, а также блоков первого и второго уровня. Структура и принцип действия предлагаемой базовой коммутационной ячейки является также предметом данной статьи.

В работе проведен сравнительный анализ предложенной коммутационной системы с уже существующими. В результате показано, что для ее построения требуется значительно меньшее число базовых элементов, что позволит снизить стоимость и повысить надежность описанной системы. Более того, число каскадов предложенной автором системы в 4 раза меньше числа каскадов существующих схем коммутации, что позволит уменьшить вероятность блокировок и повысить ее быстродействие.

Кроме этого, особенностью предлагаемой двухкаскадной коммутационной системы является новый способ управления, заключающийся в размещении управляющих устройств в самих коммутационных элементах и частотном разделении управляющего и информационного сигналов. Данный способ управления не требует обращения к центральному процессору и позволит повысить быстродействие коммутационной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парыгин Д.С. Модель интеркоммуникационной системы обеспечения потребностей жителей города // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т 17, № 14 (117). – С. 90–95.
2. El-Bawab T.S. Optical switching. – New York: Springer Science and Business Media, 2006. – 451 p.
3. Гайворонская Г.С., Рябцов А.В. Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях // Applicable Information models. – Sofia: ITHEA, 2011. – С. 169–181.
4. Hwang F.K. A survey of nonblocking multicast three-stage clos networks // IEEE Communications Magazine. – 2003. – Vol. 41 (10). – P. 34–37.
5. Riza N.A., Madamopoulos N. Compact switched-retroreflection-based 2x2 optical switching fabric for WDM applications // Journal of Lightwave Technology. – 2005. – Vol. 23, iss. 1. – P. 247–260.
6. Барабанова Е.А., Береснев И.А., Барабанов И.О. Управление элементами коммутации в оптической системе с параллельным поиском каналов связи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 89–97.
7. 160-Gb/s Silicon All-Optical Packet Switch for Buffer-less Optical Burst Switching / H. Hu, H. Ji, M. Pu, M. Galili, K. Yvind K., L.K. Oxenløwe // Journal of Lightwave Technology. – 2015. – Vol. 33, iss. 4. – P. 843–848.
8. Reconfigurable multipipeline computing structures / I.A. Kaliaev, I.I. Levin, E.A. Semernikov, V.I. Shmoilov. – Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2012. – 340 p.
9. The design of an electro-optic control circuit for photonic packet switching applications / J.S. Van der Merwe, R. Geldenhuys, K. Thakulsukanant, Z. Wang, N. Chi, S. Yu // AFRICON 2007, IEEE, September 26–28, 2007. – Windhoek, Namibia, 2007. – P. 1–6.
10. Barabanov I.O., Maltseva N.S., Barabanova E.A. Switching cell for information transmission optical systems // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016. – Saratov, 2016. – P. 343–347.

11. Фотонная коммутационная ячейка: патент на полезную модель / Е.А. Барабанова, К.В. Выговтов, Н.С. Мальцева, И.О. Барабанов. – № 2017128161/28; заявл. 07.08.2017.
12. *Выговтов К.А.* Эффект втягивания электромагнитной волны одноосной анизотропной средой с магнитной анизотропией // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2017. – № 2. – С. 33–39.
13. *Выговтов К., Belimenko O.* Angle dependance reflection properties of stratified anisotropic structure with arbitrary anisotropy axis orientation // Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET 2014. – Dnipropetrovsk, Ukraine, 2014. – P. 61–64.
14. *Руденко Д.В.* Структурные характеристики оптических коммутаторов // Мир транспорта. – 2012. – № 4. – С. 124–129.
15. *Esmael Zeinali K.H., Fesharaki M.N.* NMR: a new approach for optimal design of strictly non-blocking multistage interconnection networks // Journal of Applied Sciences. – 2008. – Vol. 8 (19). – P. 3453–3459.

*Барабанова Елизавета Александровна*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – методы построения оптических коммутационных систем. Имеет более 50 публикаций, в том числе 2 монографии и 4 патента. E-mail: elizavetaalex@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18

### ***An optical two-stage switching system for processing large amounts of data\****

*E.A. BARABANOVA<sup>1</sup>*

*Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: elizavetaalex@yandex.ru*

The existing optical switching systems are built on the basis of 2x2 cells. Such schemes include the Benes, Shpanke and Shpanke-Benes schemes. They have low scalability and a large number of inputs and are characterized by low reliability and low performance. A new scheme of an optical two-stage switching system with 256 inputs and 256 outputs for fiber-optic communication systems is proposed. The switching system is non-blocking and fully accessible. The principal difference between the proposed switching system and the existing ones is its new construction scheme, as well as the fact that it is based on new optical switching cells having 4 inputs and 4 outputs. The optical switching cells are combined into 16-input and 16 output switching blocks. A comparison was made between the values of structural characteristics of the existing switching circuits of optical switches and the proposed two-stage switching system. It is shown that the proposed scheme is much less complex and contains a much smaller number of cascades, and thus has a higher reliability and speed. In the proposed optical two-stage switching system, a decentralized control method is realized. For this purpose it is proposed to use the principle of frequency separation of the control and information wave. To control an information wave in the structure of the switching cell, control devices are provided, namely a Bragg filter, a frequency detector, and a driver for the control signal. This control method allows increasing the switching speed since the control process takes place in the switching cells themselves and does not require frequent access to the processor.

**Keywords:** optical switching system, switching cell, switching unit, cascades, Bragg filter, buffer device, delay line, wavelength

---

\* Received 24 September 2018.

## REFERENCES

1. Parygin D.S. Model' interkommunikatsionnoi sistemy obespecheniya potrebnosti zhitelei goroda [Model intercommunication system of ensuring needs of city inhabitants]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2013, vol. 17, no. 14 (117), pp. 90–95.
2. El-Bawab T.S. *Optical switching*. New York, Springer Science and Business Media, 2006. 451 p.
3. Gaivoronskaya G.C., Ryabtsov A.V. [Features of the use of optical switches in modern information networks]. *Applicable Information Models*. Sofia, ITHEA, 2011, pp. 169–181. (In Russian).
4. Hwang F.K. A survey of nonblocking multicast three-stage clos networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, vol. 41 (10), pp. 34–37.
5. Riza N.A., Madamopoulos N. Compact switched-retroreflection-based 2x2 optical switching fabric for WDM applications. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, iss. 1, pp. 247–260.
6. Barabanova E.A., Beresnev I.A., Barabanov I.O. Upravlenie elementami kommutatsii v opticheskoj sisteme s parallel'nym poiskom kanalov svyazi [Control of switching elements in an optical system with parallel search for communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2017, no. 1, pp. 89–97.
7. Hu H., Ji H., Pu M., Galili M., Yvind K., Oxenløwe L.K. 160-Gb/s Silicon All-Optical Packet Switch for Buffer-less Optical Burst Switching. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, iss. 4, pp. 843–848.
8. Kaliaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoilov V.I. *Reconfigurable multipipeline computing structures*. Hauppauge, NY, Nova Science Publishers, 2012. 340 p.
9. Merwe J.S. van der, Geldenhuys R., Thakulsukanant K., Wang Z., Chi N., Yu S. The design of an electro-optic control circuit for photonic packet switching applications. *AFRICON 2007*, IEEE, September 26–28, 2007, Windhoek, Namibia, pp. 1–6.
10. Barabanov I.O., Maltseva N.S., Barabanova E.A. Switching cell for information transmission optical systems. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016*. Saratov, 2016, pp. 343–347.
11. Barabanova E.A., Vytovtov K.V., Maltseva N.S., Barabanov I.O. *Fotonnaya kommutatsionnaya yacheika: patent na poleznyuyu model'*. Application, no. 2017128161/28, 2017.
12. Vytovtov K.A. Effekt vtvagivaniya elektromagnitnoi volny odnoosnoi anizotropnoi sredoi s magnitnoi anizotropiei [Penetration effect of an uniaxial anisotropic medium with magnetic anisotropy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika – Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2017, no. 2, pp. 33–39.
13. Vytovtov K., Belimenko O. Angle dependance reflection properties of stratified anisotropic structure with arbitrary anisotropy axis orientation. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET 2014*, Dnipropetrovsk, Ukraine, 2014, pp. 61–64.
14. Rudenko D.V. Strukturnye kharakteristiki opticheskikh kommutatorov [Structural characteristics of optical switches]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2012, no. 4, pp. 124–129.
15. Esmaeel Zeinali K.H., Fesharaki M.N. NMR: a new approach for optimal design of strictly non-blocking multistage interconnection networks. *Journal of Applied Sciences*, 2008, vol. 8 (19), pp. 3453–3459.

Для цитирования:

Барabanова Е.А. Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объемов данных // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 7–18. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18.

For citation:

Barabanova E.A. Opticheskaya dvukhkaskadnaya kommutatsionnaya sistema dlya obrabotki bol'shikh ob'emov dannykh [An optical two-stage switching system for processing large amounts of data]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 7–18. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18.