

На правах рукописи

БАРАБАНОВА ЕЛИЗАВЕТА АЛЕКСАНДРОВНА

**ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОННЫХ
КОММУТАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЕТЕЙ СВЯЗИ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Астрахань – 2020 г.

Работа прошла апробацию в институте информационных технологий и коммуникаций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный технический университет»

Научный консультант:

доктор технических наук,
главный научный сотрудник
Института проблем управления РАН
им. В.А. Трапезникова
Вишневецкий Владимир Миронович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Защита состоится 15.06.2020 в 10:00 на заседании диссертационного совета ФРКТ.05.12.13.003 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>

Работа представлена «25» февраля 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В связи с увеличением объема передаваемой информации в узлах связи и центрах обработки данных к пропускной способности современных систем телекоммуникаций предъявляются высокие требования. С одной стороны, волоконно-оптические линии связи способны передавать информационные потоки со скоростью порядка единиц Тбит/с, с другой – самые производительные коммутаторы не позволяют обработать этот объем информации без задержек, так как их пропускная способность не превышает сотни Гбит/с. Данное несоответствие обусловлено тем, что на практике чаще всего используются оптоэлектронные коммутаторы, обладающие недостаточным быстродействием для обработки больших объемов информации в перспективных 5G и 6G сетях. В то же время полностью оптические коммутаторы способны решить задачу транспортировки больших данных без задержек в сетях связи нового поколения. Они имеют ряд существенных преимуществ, таких как высокое быстродействие, меньшие геометрические размеры, меньшую потребляемую мощность, меньшие потери и т. д. В связи с этим задача разработки методов построения полностью оптических коммутационных систем нового поколения, обладающих высоким быстродействием и позволяющих обрабатывать большие объемы данных, представляется актуальной для проектирования оптических систем связи и имеет большое практическое значение.

В последнее время для разработки оптических коммутаторов рядом ученых предлагается использовать новые материалы: наноповерхности, метаповерхности и объемные метаматериалы. Представленные в научной литературе коммутационные ячейки на такого рода современных материалах дают приемлемое на практике быстродействие (Тбит/с), однако авторы представленных разработок не брали в расчет задержки системы управления и скорость изменения параметров структуры, например, теплоемкость и т.д., а также задержки за счет несовершенства схемных решений. Более того, эти ячейки фактически представляют собой оптические ключи с двумя выходами, которые обеспечивает либо прохождение, либо отражение информационного луча при наличии управляющего сигнала. Использование такого рода элементов для построения коммутационных систем большой емкости приводит к значительному увеличению числа каскадов системы и ее сложности, а также увеличивает время обработки сигнала.

Поэтому актуальным и значимым является теоретическая и практическая разработка оптических коммутационных систем сетей связи нового поколения, основанных на современных материалах и

обеспечивающих высокую пропускную способность систем телекоммуникаций.

Степень научной разработанности темы

Изучением вопросов построения оптических и электронных коммутационных систем занимаются ученые, круг научных интересов которых лежит в области построения быстродействующих вычислительных систем и систем телекоммуникаций. Разработкой схем многокаскадных коммутационных систем, алгоритмов распределенной обработки данных, а также математических методов, которые могут быть использованы для описания как оптических, так и электронных узлов связи занимаются ученые Института проблем управления РАН им. Трапезникова: Вишнеvский В.М., Подлазов В.С., Стецюра Г.Г., Каравай М.Ф. Научная школа НИИ МВС Южного федерального университета Каляева И.А. занимается разработкой архитектур реконфигурируемых мультиконвейерных вычислительных структур, в том числе на базе многокаскадных коммутационных систем. Существенный вклад в развитие теории коммутации и передачи данных с учетом требований, предъявляемых современными технологиями связи, внесли Степанов С.Н., Нетес В.А., Кучеряvый А.Е., Гольдштейн Б.С., Карташевский В.Г. и др. В лаборатории «Параллельных информационных технологий» научно-исследовательского вычислительного центра МГУ ведутся разработки высокопроизводительных технологий, которые служат основой для развития одного из крупнейших суперкомпьютерных комплексов в России. Разработкой фотонных вычислительных систем, основанных на потоковых вычислениях и бесконфликтных алгоритмах обработки информации процессорами, занимаются ученые из Всероссийского НИИ экспериментальной физики (г.Саров). В качестве быстродействующей мультипроцессорной коммутационной системы, объединяющей фотонные процессоры, они предлагают использовать такие топологии как 3D-тор, Γ^n -гиперкуб и Dragonfly, главным недостатком которых является блокируемость при параллельной передаче данных. Актуальными также являются вопросы обработки информации в оптических системах связи, которыми занимаются ученые Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича (Кузьмин М.С., Рогов С.А. и др.), а также проводимые в Федеральном научно-исследовательском центре «Кристаллография и фотоника» РАН разработки высокоскоростных оптических межсоединений на печатной плате. Исследованиями, посвященными разработке новых схем, алгоритмов оптических коммутационных систем, развитию и интеграции оптоволоконных и беспроводных систем связи занимаются и зарубежные ученые, среди них наибольший интерес в рамках данной работы

представляют труды Tarek S. El-Bawab, Martin Maier, Ronelle Geldenhuys, Francesco Testa, Lorenzo Pavesi и др. Большинство исследований как отечественных, так и зарубежных ученых направлены на развитие оптических систем связи и обработки информации за счет применения новых алгоритмов работы сетей, использования современных подходов к аппаратной реализации коммутационных узлов и обработки сигналов. При этом вопросам построения масштабируемых оптических коммутационных систем с сохранением свойства неблокируемости и обладающих высокой пропускной способностью уделяется недостаточное внимание. Поэтому возникает необходимость в разработке нового подхода к построению полностью оптических коммутационных систем сетей связи нового поколения для обработки больших объемов данных, отличающихся малой сложностью, а также отсутствием блокировок при произвольных перестановках и параллельной передаче информации.

Потребность в разработке новых технологий для обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта обуславливает их включение в перечень приоритетных перспективных направлений научно-технологического развития Российской Федерации.

Выполненный анализ научных работ показал, что, несмотря на значительные результаты в теории построения электронных и оптоэлектронных коммутаторов, отсутствует теоретическое обоснование для разработки полностью оптических коммутационных систем, алгоритмов их работы и математических моделей для расчета основных характеристик. В соответствии с этим, **научной проблемой** диссертации является разработка принципов и методов построения полностью оптических коммутационных систем без внешнего электронного управления для перехода на фотонные системы передачи информации.

Согласно выше сказанному, были сформулированы объект, предмет, а также цель и задачи исследования.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка новых принципов, методов построения и функционирования полностью оптических неблокируемых коммутационных систем для обеспечения высокоскоростной обработки информации и передачи больших объемов данных в современных системах телекоммуникаций.

Задачи исследования

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

1. Анализ современного состояния науки и техники в области построения фотонных коммутационных систем.

2. Разработка метода параллельной передачи сигналов для неблокируемых фотонных коммутационных систем с распределенным управлением.
3. Разработка новых принципов построения и алгоритмов работы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения на основе коммутаторов 4×4 нового типа.
4. Разработка новых принципов построения и алгоритмов работы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения на основе коммутаторов 8×8 нового типа.
5. Разработка метода оценки сложности фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения.
6. Разработка математических моделей для расчета сложности фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения на основе коммутаторов 4×4 и 8×8 нового типа.
7. Разработка методов расширения фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения, предназначенных для обработки больших объемов данных.
8. Разработка физико-математических моделей устройств коммутационных систем сетей связи нового поколения (отклоняющих систем, частотного детектора, фильтра Брэгга, формирователя управляющих сигналов) и оценка их быстродействия.

Объектом исследования являются фотонные коммутационные системы сетей связи нового поколения.

Предметом исследования являются математические и физико-математические модели, схемы и алгоритмы работы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения и их элементов.

Методы исследований

Для построения математических моделей фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения использованы элементы теории множеств и теории графов, а также метод математической индукции. При разработке схем коммутационных систем в целом использованы методы каскадного расширения коммутатора. Для расчета сложностей базовых элементов коммутационных систем использованы методы булевой алгебры. Алгоритмы работы коммутационных систем разработаны с использованием теории алгоритмов и языка блок-схем. Оценка периода сигналов, требуемого для обеспечения неблокируемости фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения, проводится на основе метода имитационного моделирования. Для создания программы-имитатора использован язык программирования Python.

При расчете коэффициентов отражения и прохождения в изотропных и анизотропных структурах, на основе которых построены элементы коммутационных систем сетей связи нового поколения, использованы матричные методы расчета в геометрической оптике. Вычислительные эксперименты проводятся в программном пакете Maple.

Научная новизна работы

1. Новый метод параллельной передачи сигналов для фотонных коммутационных систем с распределенным управлением, *отличающийся* поразрядной передачей информационных и управляющих сигналов и позволяющий обеспечить полностью оптическую передачу и обработку информации без блокировок.
2. Математические модели фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , 64×64 и 256×256 , *позволяющие* оценить их схемную и коммутационную сложности.
3. Алгоритмы работы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , 64×64 и 256×256 , основанные на теории множеств и графов, *отличающиеся* введением специальных функций и дополнительных условий, отвечающих спецификам функционирования предлагаемых фотонных коммутационных систем.
4. Схемы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , 64×64 и 256×256 , *отличающиеся* наличием самонастраивающихся элементов в коммутационных устройствах, реализующих метод параллельной поразрядной передачи сигналов и обеспечивающих полностью оптическую передачу и обработку информации без блокировок.
5. Новые схемы оптических коммутационных ячеек и их физико-математические модели, имеющие четыре и восемь пространственно-разнесенных выходов на основе двумерных фотонных кристаллов сложной конфигурации, *отличающиеся* использованием принципа пространственного разнесения сигналов в зависимости от значения управляющего воздействия.
6. Новый принцип пространственного разделения каналов связи, *отличающийся* использованием метаматериала для увеличения разнесения информационных лучей в оптической коммутационной ячейке, что повышает помехоустойчивость узлов связи и раскрывает новые возможности и перспективы использования данных материалов в системах телекоммуникаций.
7. Новая схема системы управления коммутационными устройствами, *отличающаяся* наличием управляемых линий задержки и элементов

управления отклоняющей системой, позволяющая реализовать децентрализованный поиск свободных каналов связи без блокировок.

8. Новый принцип построения многокаскадных неблокируемых фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения большой емкости, *отличающийся* применением метода инвариантного расширения произвольных системных сетей на основе квазиполного орграфа к новым схемам (пункт 4), позволяющий уменьшить величину задержки сигналов в 12 раз.

9. Математические модели многокаскадных фотонных коммутационных систем большой размерности, *позволяющие* оценить их сложность для задачи выбора варианта построения фотонной коммутационной системы, наиболее подходящего при заданных характеристиках сети связи.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке комплекса методов построения фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения, включающих в себя математические и физико-математические модели, схемы и алгоритмы работы устройств, методику расчета параметров систем и характеристик устройств.

Практическая значимость работы

Предложенные в диссертационном исследовании принципы и методы построения фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения позволяют повысить быстродействие оптических систем связи. Результаты диссертации внедрены в проектную деятельность ООО «Терра-Юг» (г.Краснодар), в деятельность предприятия ПАО «Ростелеком» (г.Астрахань), ООО ПКФ «Астрахань-Телеком», ООО «Связьинформ» и использованы на практике в учебном процессе Астраханского государственного технического университета и Волгоградского государственного технического университета, о чем имеются соответствующие акты о внедрении.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод параллельной поразрядной передачи сигналов для неблокируемых фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения, который позволяет обеспечить передачу и обработку информации без блокировок в полностью оптических системах.

2. Математические модели, которые позволяют проводить расчеты и оценку схемной и коммутационной сложностей неблокируемых фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , 64×64 и 256×256 .

3. Схемы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , 64×64 и 256×256 , которые обеспечивают неблокируемую высокоскоростную параллельную поразрядную передачу оптических сигналов без использования внешнего управляющего устройства.
4. Алгоритмы работы фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения, обеспечивающие выполнение условий строгой неблокируемости и децентрализации управления в процессе их функционирования, в том числе для полностью оптических систем размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , 64×64 и 256×256 .
5. Схемы оптических коммутационных ячеек, имеющих четыре и восемь пространственно-разнесенных выходов на основе двумерных фотонных кристаллов сложной конфигурации, которые обеспечивают быстродействие коммутационной системы порядка единиц пикосекунд, а также их физико-математические модели, которые позволяют рассчитать потери в узлах системы.
6. Принцип пространственного разнесения каналов связи на основе использования элементов коммутации с включением слоев из метаматериала, позволяющий осуществлять функционирование коммутационных систем в рамках линейных характеристик, что существенно увеличивает их быстродействие.
7. Новая схема системы децентрализованного управления оптическими коммутационными устройствами с использованием ректенн, которая обеспечивает быстродействие порядка единиц пикосекунд, что на порядок выше быстродействия существующих оптических систем коммутации.
8. Новый принцип построения фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения большой емкости, обеспечивающий строгую неблокируемость при увеличении быстродействия в 12 раз.
9. Математические модели, которые позволяют проводить расчеты и оценку сложности неблокируемых фотонных коммутационных систем большой емкости.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность научных положений и выводов определяется корректным применением строгих аналитических методов исследований, подтверждается вычислительными экспериментами, результатами имитационного моделирования, а также успешным внедрением результатов в различных организациях, о чем имеются соответствующие акты.

Апробация полученных результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: The Third International Conference «High

Performance Computing» (Украина, Киев, Октябрь 7-11, 2013г.); The International Scientific – Practical Conference «Innovative information technologies» (Чехия, Прага, 21-25 апреля 2014г.), 11th Joint Conference on Knowledge-Based Software Engineering (Волгоград, 2014г.), Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014, АПЭП-2016 и АПЭП-2018 (Саратов, 25-26 сентября 2014г., 22-23 сентября 2016г., 27-28 сентября 2018г.); First conference Creativity in Intelligent, Technologies and Data Science (Волгоград, 2015г.); 21st International Conference, DCCN 2018 (Москва, 17-21 сентября 2018г.); IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (Санкт-Петербург, 10-14 сентября 2018г.); 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials (Финляндия, Espoo, 27-30 августа 2018г.), International Conference on Metamaterials and Nanophotonics (Сочи, 17-21 сентября 2018г.), II международной молодежной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (Астрахань, 11-14 сентября 2018г.); 2019 и 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Санкт-Петербург, 28-29 января 2019г., 27-28 января 2020г.); V международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 21-24 мая 2019г.); 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials (Италия, Рим, 16-19 сентября 2019г.), 22st International Conference, DCCN 2019 (Москва, 23-27 сентября 2019г.); III Международной молодежной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (Астрахань, 1-5 октября 2019 г.).

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной научно-исследовательской работой кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета по теме «Перспективные высокоскоростные инфокоммуникационные системы» 2013-2019г. (№ Гос. регистрации 01201450580); научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, проводимыми ФГБОУ ВО АГТУ в рамках государственного задания учредителя (Росрыболовство) по темам: «Разработка автоматизированных рабочих мест для специалистов рыбохозяйственного комплекса и сельского хозяйства с использованием мобильных приложений» 2015г. (№ Гос. регистрации 115031110019); «Разработка систем поддержки принятия решений для специалистов рыбохозяйственной отрасли и в сфере сельского хозяйства с использованием геоинформационных технологий» 2016г. (№ Гос. регистрации АААА-А16-116031150055-8), «Создание банков данных и геоинформационных систем различного назначения с использованием открытой топографической информации для обеспечения потребностей

рыболовства» 2017г. (Гос. регистрации АААА-А18-118012390402-3), «Исследование средств обеспечения поддержки принятия решений в технологических процессах рыбохозяйственной отрасли» 2018г. (Гос. регистрации АААА-А18-118031990036-5); «Технологии инфокоммуникаций и связи нового поколения в рыбохозяйственной отрасли» 2019 г. (Гос. регистрации АААА-А19-119041990053-0).

Работа проводилась при поддержке Гранта РФФИ: 18-37-00059 мол_a по теме «Исследование двумерных фотонных кристаллов на основе гиперболических метаматериалов и управляемых анизотропных материалов для построения быстродействующих оптических коммутационных систем», по которому автор диссертации является руководителем.

Результаты работы изложены на конкурсе «Цифровой экономики, инноваций и инновационных проектов – новое поколение 2017/2018» Международной академии связи в номинации «Конкурс концептуальных идей, методик и рекомендаций» по теме: «Повышение производительности оптических систем обработки информации, основанное на применении нового типа коммутационных элементов на базе современных метаматериалов и анизотропных нанопленок», работа удостоена диплома Лауреата 1 степени.

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 57 публикациях, из них: 2 – монографии, 20 – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus/Web of Science; 7 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, из них 1 – из списка RSCI. Получено 4 патента и два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора

Вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении, обработке и анализе результатов исследований.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 279 страниц машинописного текста, 132 рисунка, 27 таблиц и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 250 наименований и приложения на 13 листах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении содержится краткий исторический обзор, обоснование актуальности темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, приводится ее краткое содержание, отмечается научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния науки в области построения оптических коммутационных систем, рассматриваются существующие технологии разработки полностью оптических коммутаторов, особенности применения современных материалов для их построения, а также схемы и алгоритмы работы.

На сегодняшний день различные оптические коммутационные системы для обработки больших объемов информации и их элементы широко изучаются в современном научном мире. Из всех видов коммутаторов наибольшим быстродействием обладают электрооптические коммутаторы на фотонных кристаллах, время переключения которых составляет десятки и сотни пикосекунд.

Проведен анализ работ (M. Oya, H. Kishikawa, N. Goto, S. Yanagiya, M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, Misaki Takahashi, Hiroki Kishikawa, Nobuo Goto and Shin-ichiro Yanagiya, Dimitrios Chatzidimitriou and Emmanouil E. Kriezis, Behrad Gholipour, Jianfa Zhang, Jonathan Maddock, Kevin F. MacDonald, Daniel W. Hewak and Nikolay I. Zheludev и др.), в которых описывается построение оптических коммутационных элементов с использованием современных материалов, таких как гиперболические метаматериалы, графеновые пленки и углеродные нанотрубки. Большая часть из них представляет собой коммутационные ячейки размерностью 1×2 или 2×2 , использование которых для построения фотонных коммутационных систем большой емкости нецелесообразно в виду значительного усложнения схем коммутационных систем, построенных на их основе.

Рассмотрены способы управления процессом коммутации, применяемые в современных коммутационных системах. Отмечено, что большинство оптических коммутационных систем управляются внешним электронным процессором, задержки при обращении к которому снижают быстродействие существующих оптических коммутационных систем до единиц наносекунд (Стецюра Г.Г., Tae Joon Seok и др.). В системах с децентрализованным управлением процесс поиска свободных каналов связи происходит с помощью локальных управляющих элементов в соответствии с управляющей информацией, содержащейся в заголовке пакета, и в теории коммутации называется *самомаршрутизацией* или маршрутизацией с распределенным управлением. Самомаршрутизация

называется статической, если существует один единственный канал связи между входом и выходом коммутационной системы.

Теория построения электронных коммутационных систем с бесконфликтной статической самомаршрутизацией на примере кольцевых коммутаторов и гиперкубов представлена в работах Подлазова В.С. Но она не применима для построения коммутационных систем с большим числом абонентов, а также требует существенной доработки в части разработки оптической схемы децентрализованного управления для использования ее при построении фотонных коммутаторов.

Проведен анализ работ (Каляев И.А., Витиска Н.И., Степаненко С.А.), где для связи абонентов или процессоров между собой используются базовые схемы, такие как схемы Бенеша, Шпанке, Шпанке-Бенеша, матричные и баньяноподобные структуры, схемы Клоза, обобщенный гиперкуб, а также многокаскадные схемы. Все перечисленные виды схем в общем случае либо являются блокируемыми, либо требуют реализации сложных алгоритмов перестроения каналов связи для обеспечения бесконфликтной передачи данных во внешнем управляющем устройстве, что не позволяет использовать их для построения фотонных коммутационных систем большой емкости.

В результате исследования, проведенного в 1 главе, показано, что, в данной научной области, при существующих научных разработках, отсутствует единый подход к построению фотонных коммутационных систем, что обуславливает необходимость дальнейших научных исследований.

Вторая глава посвящена разработке метода построения оптических неблокируемых коммутационных систем на основе базового оптического коммутатора 4×4 , на примере систем 16×16 , 256×256 . Базовый коммутатор 4×4 состоит из буферного устройства с линиями задержки (ЛЗ) и элемента коммутации (Рис. 1). Особенностью структуры элемента коммутации является наличие управляющих элементов, которые обеспечивают процесс поиска канала связи; к ним относятся оптическое интегральное устройство (ОИУ), фильтр Брэгга (ФБ), частотный детектор (ЧД), формирователь управляющего сигнала (ФУС). Входной оптический сигнал, состоящий из управляющих сигналов, передаваемых на длине волны λ_i и λ_j и информационного сигнала, передаваемого на длине волны λ_p , поступает на фильтр Брэгга элемента коммутации. Возможные комбинации управляющих сигналов приведены в таблице 1.

В фильтре Брэгга происходит разделение направления оптических сигналов по частоте: управляющие сигналы поступают на частотный детектор, а информационный сигнал поступает на отклоняющую систему, которая представляет собой фотонный кристалл. Частотный детектор

преобразует частоту управляющего сигнала в его амплитуду. Амплитудно-модулированный оптический сигнал с частотного детектора поступает на формирователь управляющего сигнала, где происходит преобразование амплитуды оптической волны в управляющий сигнал. Управление может осуществляться посредством электрического, магнитного или светового сигнала. Комбинация из двух значений управляющих сигналов однозначно определяет четыре режима работы отклоняющей системы, а значит, информационный сигнал может быть направлен на один из четырех выходов.

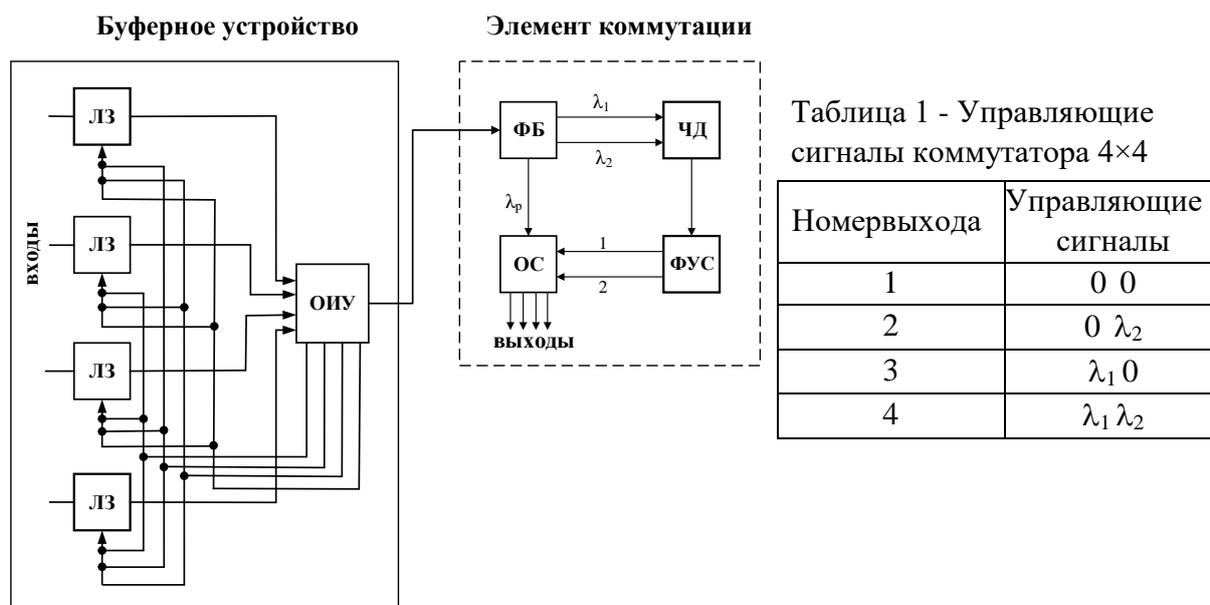


Рис.1- Структурная схема фотонного коммутатора 4×4

Так как вход в элемент коммутации один, а число входов в ячейку коммутации четыре, то для согласования и исключения блокировок используется буферное устройство. Оно состоит из четырех линий задержки – по одной на каждый вход, подключенных ко входам оптического интегрального устройства, выполняющего функцию мультиплексора сигналов и управляющего их возвратом на линию задержки. Таким образом, оптическое интегральное устройство с обратными связями через линии задержки придает коммутатору функцию динамической задержки сигналов.

Для описания работы коммутатора 4×4 в работе использованы понятия теории множеств и графов, согласно которым коммутатор 4×4 представлен в виде ориентированного двудольного графа G (Рис.2), а его элементы описаны следующим образом: $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ - множество входов коммутатора; $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ - множество выходов коммутатора; $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ - множество линий задержки коммутатора; $N = \{n\}$,

$(n=1,2,\dots,16)$ - множество каналов связи; $Q = \{1,0\}$ - множество состояний оптического интегрального устройства (1-занят; 0-свободен). На входные полюсы подается множество входных переменных $X = \{x_k\}$, где $x_k = \{\lambda_i, \lambda_j, \lambda_p\}$, $i=1,2; j=1,2$.

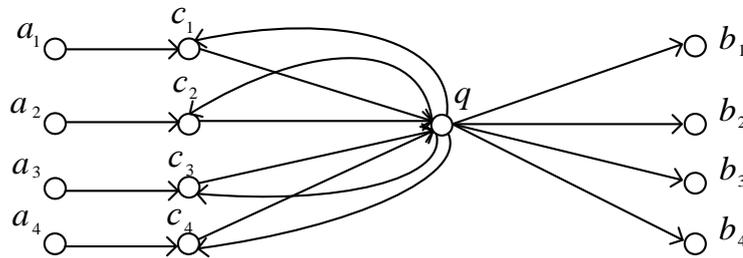


Рис. 2- Коммутационный граф системы 4×4

Для описания алгоритма работы базового коммутатора 4×4 (Рис.3) введены следующие функции:

Функция состояния входов a_i в момент времени t :

$$g(x_k(t), a_i, t) = \begin{cases} x_k(a_i, t), & \text{если сигнал присутствует на входе } a_i \\ 0, & \text{если сигнал отсутствует на входе } a_i \end{cases} \quad (1)$$

где $i = 1,2,3,4$. Т.е. если в некоторый момент времени t сигнал поступает на вход a_i коммутатора, то функция $g(x_k(t), a_i, t)$ принимает значение сигнала, в противном случае она равна нулю.

Функция состояния канала связи n :

$$q_n(t) = \begin{cases} 1, & \text{если канал занят в момент времени } t \\ 0, & \text{если канал свободен в момент времени } t \end{cases} \quad (2)$$

Функция распределения сигналов по линиям задержки с номером i :

$$p_i(t) = \begin{cases} x_k(a_i, t), & \text{если } \begin{cases} q_n(t) = 1 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} q_n(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Функция формирования канала связи в момент t :

$$S_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \begin{cases} q_n(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } q_n(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

В некоторый времени t входной сигнал поступает на один из входов a_i , а в управляющем сигнале заложена информация о выходе b_j

коммутатора. При этом функции $g(x_k(t), a_i, t)$ присваивается одно из двух возможных значений: $x_k(a_i, t)$ или 0 в соответствии с (1). Далее происходит определение занятости выхода оптического интегрального устройства и находится функция $q_n(t)$ состояния канала связи n в данный момент времени в соответствии с (2). Если n -й канал связи занят $q_n(t) = 1$, то сигнал поступает в соответствующую линию задержки c_i и далее на оптическое интегральное устройство, а функции $p_i(t)$ присваивается значение $x_k(a_i, t)$ (3). Если же канал свободен, то $p_i(t) = 0$. В случае, если выход оптического интегрального устройства свободен, то есть $q_n(t) = 0$, то по набору значений управляющих сигналов λ_i и λ_j происходит определение номера выхода коммутатора b_j (k). Так первому выходу соответствует комбинация $\{0\ 0\}$, второму – $\{0\ \lambda_2\}$, третьему – $\{\lambda_1\ 0\}$, четвертому – $\{\lambda_1\ \lambda_2\}$. После этого устанавливается канал связи между входом a_i и выходом b_j , а функции $S_i(t)$ (4) присваивается значение единицы. Далее по установленному каналу связи поступает полезная информация.

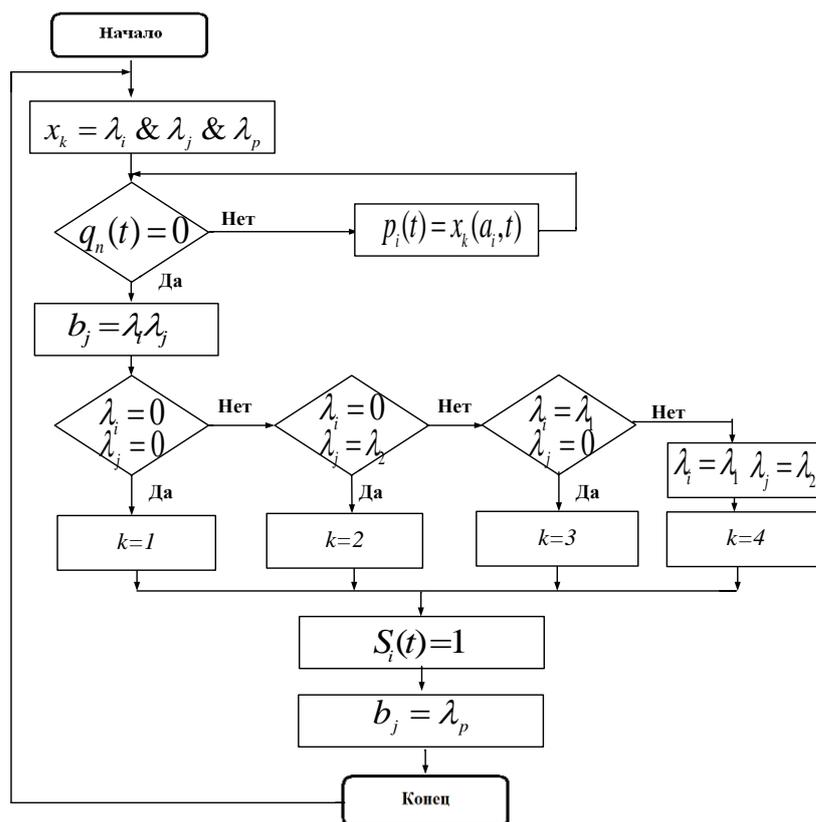


Рис. 3- Блок-схема алгоритма работы базового коммутатора 4×4

Проблема возникновения наложений сигналов в разных каскадах решена за счет использования коммутаторов К4 с разными по длительности линиям задержки (ЛЗ $_i$, i -длина линии в тактах) в разных каскадах. Для этого схема К4 (Рис.2) была представлена в обобщенном

виде (Рис. 4), где оптическое интегральное устройство с управляемыми линиями задержки представлено в виде мультиплексора на четыре входа (М4), а отклоняющая система – демультиплексора на четыре выхода (Д4). Для уменьшения числа вариантов распределений во времени выходных сигналов можно использовать более сложный вариант КК4, состоящий из двух каскадов по 4 демультиплексора Д4, 4 мультиплексора М4 в каждом и линий задержки ЛЗ_i между ними (Рис. 5).



Рис. 4- Обобщенная схема К4

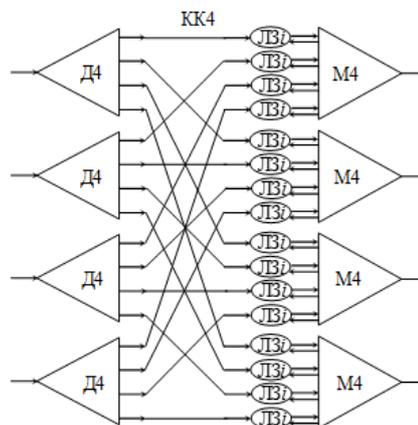


Рис. 5- Обобщенная схема КК4

В основе разработанных фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения лежит новый метод *параллельной передачи управляющих и информационных сигналов*. Данный метод заключается в параллельной поразрядной передаче управляющих и информационных сигналов (ТИ) на разных длинах волн (Рис.6).

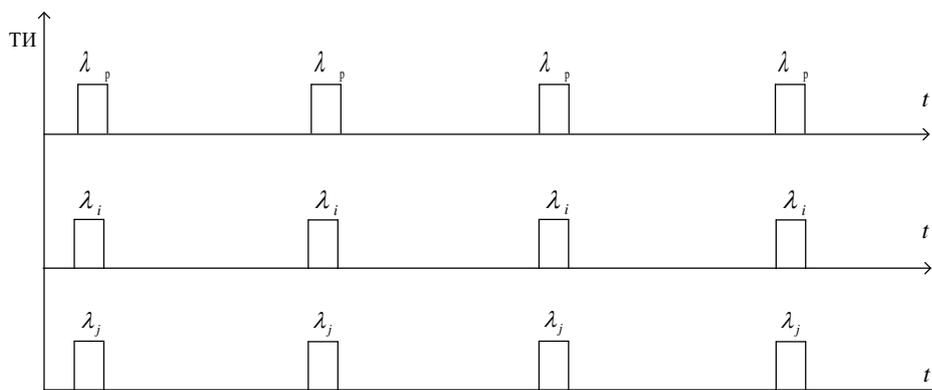


Рис. 6- Метод параллельной поразрядной передачи управляющих и информационных оптических сигналов (временная диаграмма передачи сигналов)

На основе коммутатора 4×4 построены коммутационные системы 16×16 и 256×256. Коммутатор 16×16 состоит из двух каскадов входных и выходных коммутаторов 4×4 по 4 коммутатора в каждом каскаде (Рис.7), а коммутатор 256×256 состоит из двух каскадов входных и выходных коммутаторов 16×16, по 16 коммутаторов в каждом каскаде (Рис.8).

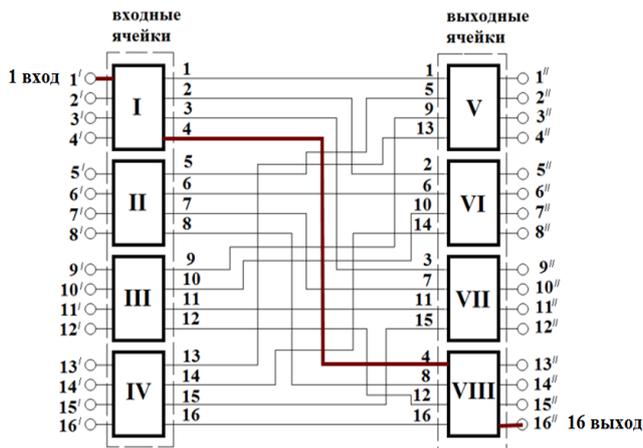


Рис. 7- Структурная схема коммутатора 16×16

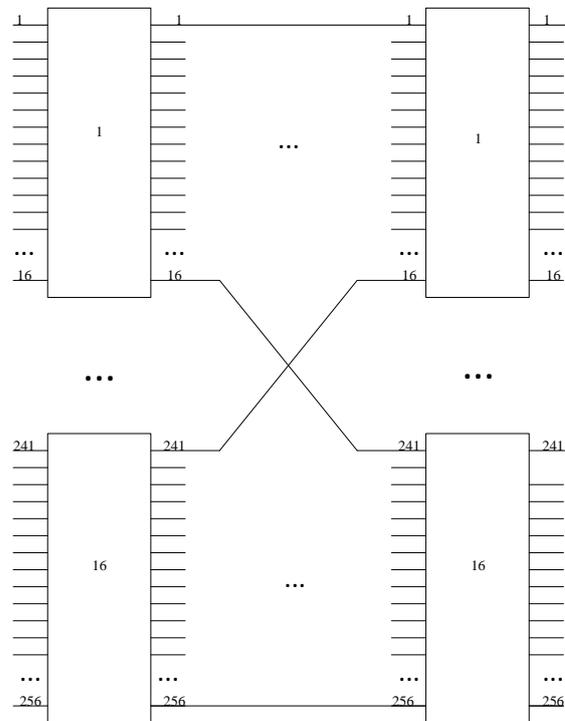


Рис. 8 - Структурная схема коммутатора 256×256

Коммутационный граф системы 16×16 (Рис. 9) описывается следующими множествами: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{16}\}$ - множество входов коммутатора первого каскада; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{16}\}$ - множество выходов коммутатора первого каскада; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{16}\}$ - множество линий задержки коммутатора первого каскада; $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{16}\}$ - множество входов коммутатора второго каскада; $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{16}\}$ - множество выходов коммутатора второго каскада; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{16}\}$ - множество линий задержки коммутатора второго каскада; $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$ - множество оптических интегральных устройств первого каскада; $W = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ - множество оптических интегральных устройств второго каскада; $F = \{1, 0\}$ - множество состояний оптического интегрального устройства коммутатора 4×4 первого каскада (1-занят; 0-свободен); $L = \{1, 0\}$ - множество состояний оптического интегрального устройства коммутатора 4×4 второго каскада (1-занят; 0-свободен); $N = \{n\}$, ($n=1, 2, \dots, 64$) - множество каналов связи, которые могут быть установлены через первый каскад коммутатора; $M = \{m\}$, ($m=1, 2, \dots, 64$) - множество каналов связи, которые могут быть установлены через второй каскад коммутатора. На входные полюсы первого каскада подается множество входных переменных $X_1 = \{x_k\}$,

$x_k \in \{\lambda_i^1, \lambda_j^1, \lambda_i^2, \lambda_j^2, \lambda_p\}$, на входные полюсы второго каскада подается множество входных переменных $X_2 = \{x_k\}$, $x_k \in \{\lambda_i^2, \lambda_j^2, \lambda_p\}$.

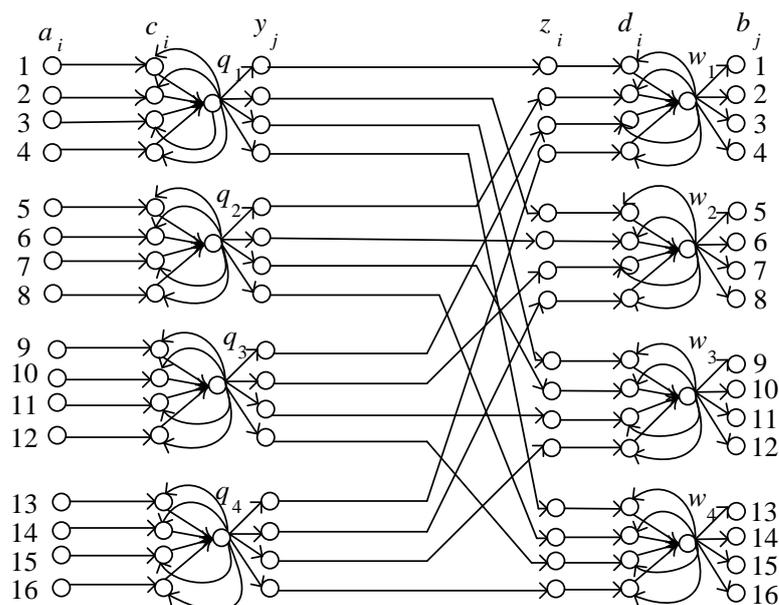


Рис. 9 – Коммутационный граф системы 16×16

Функция состояния входов a_i в момент времени t определяется по формуле (1), где $i = 1, 2, \dots, 16$. Введены две функции состояния канала связи: $f_n(t)$, которая определяет канал связи через коммутационный блок первого каскада и $l_m(t)$, которая определяет канал связи через коммутационный блок второго каскада:

$$f_n(t) = \begin{cases} 1, & \text{если канал занят в момент времени } t \\ 0, & \text{если канал свободен в момент времени } t \end{cases} \quad (5)$$

$$l_m(t) = \begin{cases} 1, & \text{если канал занят в момент времени } t \\ 0, & \text{если канал свободен в момент времени } t \end{cases} \quad (6)$$

Функции распределения сигналов по линиям задержки первого каскада с номером i $p_{1i}(t)$ и второго каскада с номером i $p_{2i}(t)$ имеют вид:

$$p_{1i}(t) = \begin{cases} x_k(a_i, t), & \text{если } \begin{cases} f_n(t) = 1 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} f_n(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

$$p_{2i}(t) = \begin{cases} x_k(z_i, t), & \text{если } \begin{cases} l_m(t) = 1 \\ g(x_k(t), z_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} l_m(t) = 0 \\ g(x_k(t), z_i, t) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

Функция формирования канала связи в момент t описывается выражением:

$$S_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \begin{cases} f_n(t) = 0 \\ l_m(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } q_n(t) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Т. е. функция $S_i(t)$ принимает единичное значение, если в данный момент времени t n -й канал от входа a_i к выходу y_j и m -й канал от входа z_i к выходу b_j свободны и на вход a_i поступает входной сигнал. В противном случае, n -й канал занят, и функция $S_i(t)$ принимает значение, равное нулю.

Алгоритм работы коммутатора 16×16 выполняется за два шага (Рис.10).

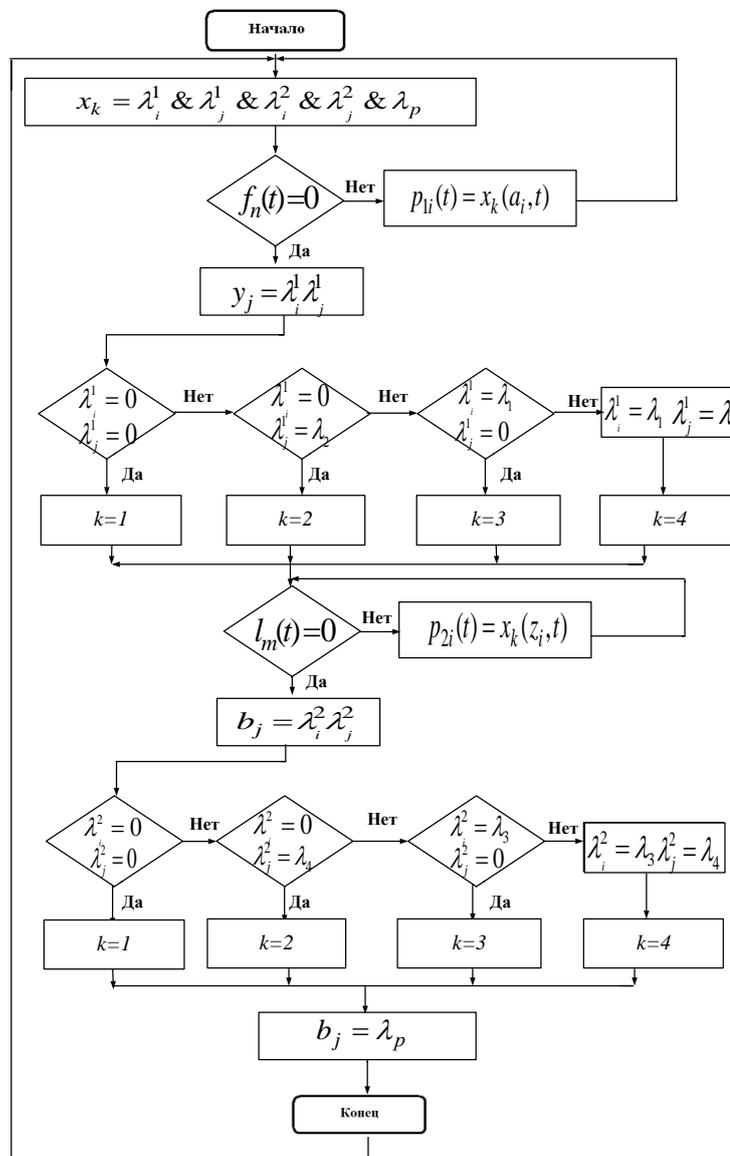


Рис. 10 – Блок-схема алгоритма работы коммутационной системы 16×16

На первом шаге работы алгоритма происходит установление канала связи через коммутационный блок первого каскада. На втором шаге работы алгоритма происходит установление канала связи через коммутационный блок второго каскада. Первый шаг работы алгоритма начинается с определения занятости выхода оптического интегрального устройства и нахождения функция $f_n(t)$ состояния канала связи n в данный момент времени в соответствии с (5). Если n -й канал связи занят $f_n(t) = 1$, то сигнал поступает в соответствующую линию задержки c_i и далее на оптическое интегральное устройство, а функции $p_{1i}(t)$ присваивается значение $x_k(a_i, t)$ (7). Если же канал свободен, то $p_{1i}(t) = 0$. В случае если выход оптического интегрального устройства свободен, то есть $f_n(t) = 0$, то по набору значений управляющих сигналов λ_i^1 и λ_j^1 происходит определение номера выхода коммутатора y_j . При этом y_j соответствует определенному выходу коммутатора 4×4 первого каскада k , где $k = \{1, 2, 3, 4\}$. Так первому выходу соответствует комбинация $\{0\ 0\}$ ($k=1$), второму – $\{0\ \lambda_2\}$ ($k=2$), третьему – $\{\lambda_1\ 0\}$ ($k=3$), четвертому – $\{\lambda_1\ \lambda_2\}$ ($k=4$) (Табл. 2). Далее происходит выполнение второго шага алгоритма. Если m -й канал связи занят $l_m(t) = 1$, то сигнал поступает в соответствующую линию задержки d_i и далее на оптическое интегральное устройство, а функции $p_{2i}(t)$ присваивается значение $x_k(z_i, t)$ (8). Если же канал свободен, то $p_{2i}(t) = 0$. В случае если выход оптического интегрального устройства свободен, то есть $l_m(t) = 0$, то по набору значений управляющих сигналов λ_i^2 и λ_j^2 происходит определение номера выхода коммутатора b_j . При этом b_j соответствует определенному выходу коммутатора 4×4 второго каскада k , где $k = \{1, 2, 3, 4\}$. Так первому выходу соответствует комбинация $\{0\ 0\}$ ($k=1$), второму – $\{0\ \lambda_4\}$ ($k=2$), третьему – $\{\lambda_3\ 0\}$ ($k=3$), четвертому – $\{\lambda_3\ \lambda_4\}$ ($k=4$) (Табл. 2). После этого устанавливается канал связи между входом a_i и выходом b_j , а функции $S_i(t)$ присваивается значение единицы. Далее по установленному каналу связи поступает полезная информация.

Таблица 2- Комбинации управляющих сигналов, соответствующие номерам выходов коммутатора 16×16

Номер выхода	Управляющие сигналы	Номер выхода	Управляющие сигналы
1	0 0 0 0	9	λ_1 0 0 0
2	0 0 0 λ_4	10	λ_1 0 0 λ_4
...
7	0 λ_2 λ_3 0	15	λ_1 λ_2 λ_3 0
8	0 λ_2 λ_3 λ_4	16	λ_1 λ_2 λ_3 λ_4

В работе предложен метод расчета сложности предлагаемых оптических коммутационных систем. Во-первых, метод предусматривает расчет сложности одного базового элемента (К4 и КК4). Для этого составляется совершенно дизъюнктивная нормальная форма функции, описывающей один из выходов базового элемента, которая затем представляется в виде схемы из функциональных элементов & (И), v (ИЛИ) и $\bar{\quad}$ (НЕ). Сложность полученной схемы и будет являться сложностью базового элемента.

Для примера, представлены функции (10), (11), (12), (13) которые определяют выход мультиплексора М4 коммутатора 4×4 с учетом срабатывания линий задержки:

$$x_1 = x'_1 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x'_2 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x'_3 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x'_4 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \quad (10)$$

$$x_2 = x'_1 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \vee x'_2 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \vee x'_3 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \vee x'_4 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \quad (11)$$

$$x_3 = x'_1 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x'_2 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x'_3 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x'_4 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \quad (12)$$

$$x_4 = x'_1 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \vee x'_2 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \vee x'_3 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \vee x'_4 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \quad (13)$$

Выражения 14-17 описывают функции на выходах демультиплексора Д4 коммутатора 4×4:

$$y_1 = x_1 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x_2 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x_3 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x_4 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2 \quad (14)$$

$$y_2 = x_1 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \vee x_2 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \vee x_3 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \vee x_4 \& \bar{\lambda}_1 \& \lambda_2 \quad (15)$$

$$y_3 = x_1 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x_2 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x_3 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \vee x_4 \& \lambda_1 \& \bar{\lambda}_2 \quad (16)$$

$$y_4 = x_1 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \vee x_2 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \vee x_3 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \vee x_4 \& \lambda_1 \& \lambda_2 \quad (17)$$

Представив функцию y_1 в виде комбинационной схемы (Рис.11), где $K1, K2, K3, K4$ - конъюнкции $x_1 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2$, $x_2 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2$, $x_3 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2$, $x_4 \& \bar{\lambda}_1 \& \bar{\lambda}_2$ соответственно, и учитывая, что сложность каждой конъюнкции равна 23, была рассчитана сложность базового элемента К4: $S = 4 \times m + 3 = 4 \times 23 + 3 = 92 + 3 = 95 \sim 6N^2$. Для базового элемента КК4 сложность составила 384, что соответствует $24N^2$, где N -число входов в коммутатор.

Во-вторых, произведена оценка сложности фотонных коммутационных систем в целом по двум подходам. Первый подход – расчет схемной сложности коммутатора, который основывается непосредственно на анализе структурных схем (Рис.1, Рис.7, Рис.8), при этом сложность базового элемента принимается равной единице.

Второй подход заключается в расчете коммутационной сложности, то есть сложности, которая учитывает общее число точек коммутации.

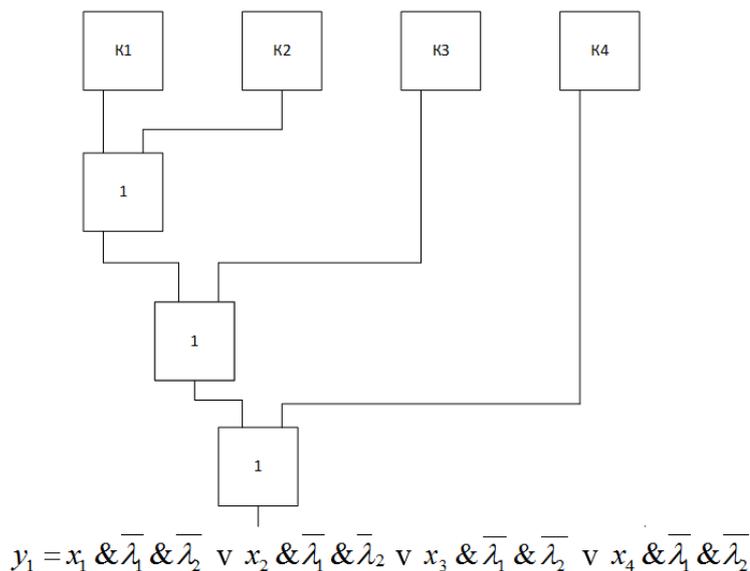


Рис. 11 – Комбинационная схема функции y_1

На основе проведенного анализа схем и использования метода математической индукции были разработаны математические модели для расчета схемной s_k и коммутационной сложности систем S_k , а также их диаметра k (в данном случае числа каскадов) в зависимости от числа входов N (Табл.3).

Таблица 3- Формулы для расчета сложности и диаметра фотонных коммутационных систем

Характеристики систем	На основе К4	На основе КК4
Схемная сложность s_k	$\frac{N}{8} \log_2 N$	$\frac{N}{2} \log_2 N$
Коммутационная сложность S_k	$N \log_2 N$	$4N \log_2 N$
Диаметр k	$\log_2 \sqrt{N}$	$\log_2 \sqrt{N}$

Коммутационная сложность предлагаемых оптических коммутационных систем, построенных на базовых элементах К4 в 4 раза меньше коммутационной сложности многокаскадных коммутационных систем, построенных на основе элементов КК4 (Рис.12).

Результаты расчет диаметра коммутационных систем показали, что диаметр предлагаемых фотонных коммутационных систем более чем в три раза меньше диаметра известных многокаскадных коммутационных систем (Рис.13).

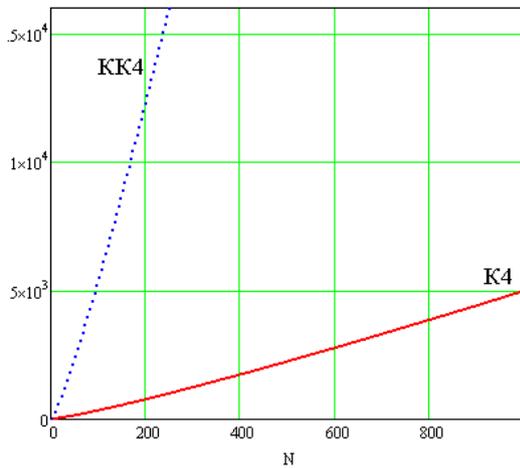
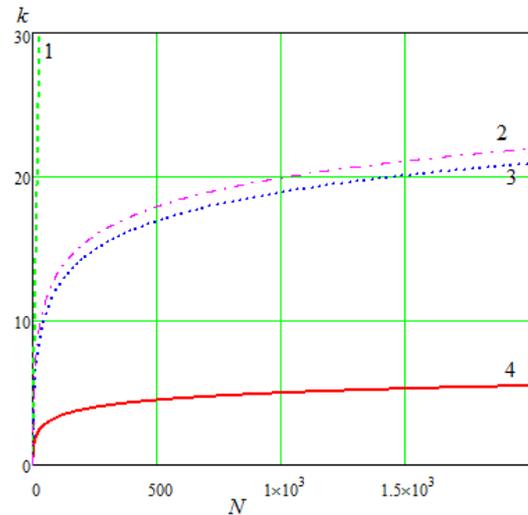


Рис. 12- Зависимости коммутационной сложности от числа входов N



1-схема Шпанке-Бенеша
2-схема Шпанке
3-схема Бенеша
4-предлагаемая коммутационная система на основе ячеек 4×4

Рис. 13-Зависимости диаметра от числа входов N

При анализе алгоритмов работы коммутаторов 4×4 и 16×16 были сформулированы условия неблокируемости данных схем. Коммутатор 4×4 , на основе как К4, так и КК4 является неблокируемым, если максимальная задержка сигналов в линиях задержки составит 4 такта ($T_k = 4$, где $k = 1$ - число каскадов коммутатора). Коммутатор 16×16 на основе К4 является неблокируемым в случае, если период сигналов составит 16 тактов ($T_2 = 16$). Таким образом, $T_2 = 4N_2/4$, т.е. имеет место линейный по числу входов рост длины периода. Коммутатор 16×16 на основе КК4 является неблокируемым при условии $T_2 = 4 = N_2^{1/2}$ или $T_2 = \log_2 N_2$, т.е. имеет место логарифмический рост длины периода в зависимости от числа входов. По результатам расчетов максимального сдвига сигналов во времени для системы 256×256 период сигналов составил $T_4 = 49 \approx 3N_4^{1/2} \approx 6 \log_2 N_4$. Дополнительно для оценки периода сигналов, необходимого для обеспечения свойства неблокируемости коммутационной системы 256×256 , была создана имитационная модель коммутатора. При использовании в третьем каскаде линий задержки ЛЗ i с $i < 15$ происходили наложения сигналов, что приводило к невозможности реализации текущей перестановки. Результаты моделирования подтвердили, что максимальный период сигналов для исключения блокировок в системе составляет 49 тактов. Таким образом, в коммутаторе 256×256 приходится использовать линии задержки большой размерности, поэтому применение данного подхода к построению фотонных коммутационных систем еще большей емкости является нецелесообразным.

В третьей главе разработаны принципы построения коммутационных систем нового поколения на основе базовых

коммутаторов 8×8 с дублированием коммутационного элемента (Рис.14). Используя коммутаторы данного типа можно строить системы следующей размерности: 64×64 , 4096×4096 , 16777216×16777216 и т.д.

Коммутатор работает следующим образом. На входы восьми управляющих элементов (УЭ1-УЭ8) элемента управления поступает оптический пакет, состоящий из двух сигналов, разделенных по времени и длинам волн информационного λ_p и управляющих сигналов λ_c . С первого выхода каждого из управляющих элементов оптические сигналы поступают на вход ключа Кл9. Со второго выхода каждого из управляющих элементов оптические сигналы поступают на вход ключа Кл10 через управляемые ключи Кл1-Кл8. С выхода ключа Кл9 сигналы поступают на управляющее устройство УУ1, а с выхода Кл10 сигналы поступают на управляющее устройство УУ2.

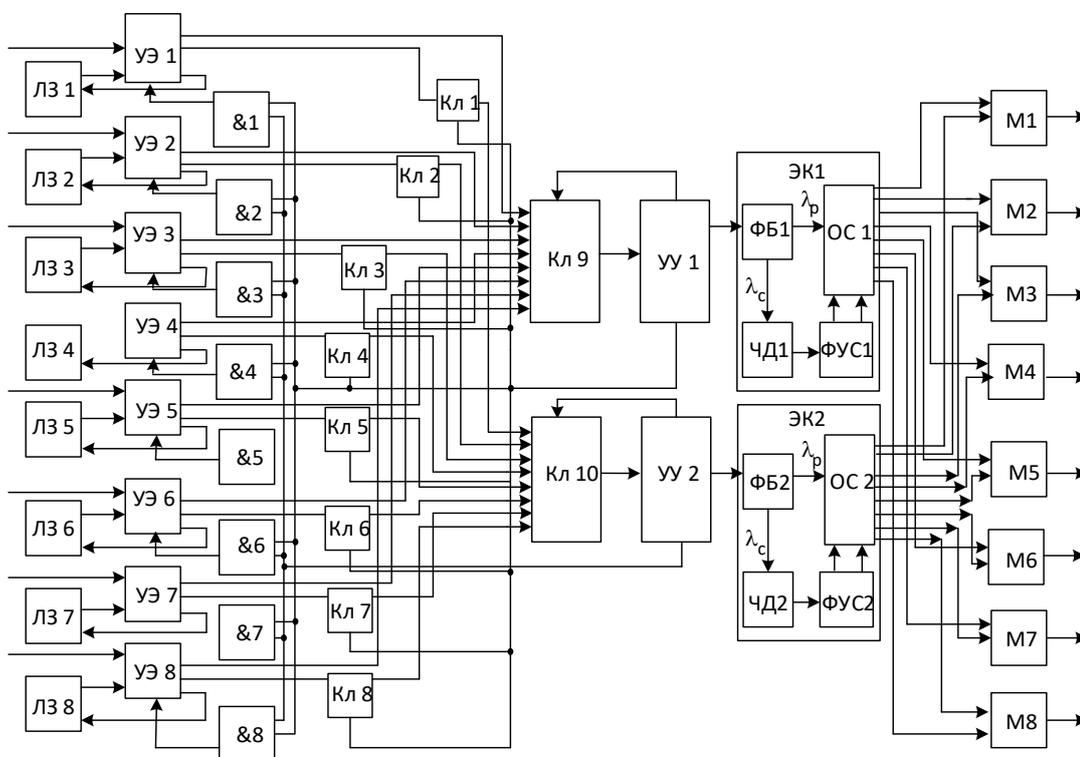


Рис. 14- Структурная схема коммутатора 8×8

В начальный момент времени управляющие устройства УУ1 и УУ2 свободны от передачи информации, при этом сигналы с выходов управляющих элементов УЭ1-УЭ8 поступают на Кл9 по описанному выше пути: УЭ n – Кл9-УУ1. Принимая во внимание, что сигналы со входов поступают на Кл9 неодновременно, на управляющее устройство УУ1 поступит только один из входных сигналов, поступивший на вход ключа Кл9 первым. При этом с выходов УУ1 поступают управляющие сигналы на ключ Кл9, элементы И (&n) и управляющие входы ключей Кл1-Кл8. Сигнал, поступающий на ключ Кл9 закрывает его для оставшихся входных сигналов. Сигнал, поступающий на управляющие входы ключей Кл1-Кл8,

открывает их для передачи входных сигналов и оставшиеся входные сигналы поступают на вход ключа Кл10 через ключи Кл1-Кл8. Принимая во внимание, что сигналы со входов поступают на ключ Кл10 не одновременно, на управляющее устройство УУ2 поступит только один из оставшихся входных сигналов, поступивший на вход Кл10 первым. При этом с выходов управляющего устройства УУ2 поступают управляющие сигналы на ключ Кл10 и элементы И (&n). Сигнал, поступающий на ключ Кл10, закрывает его для оставшихся входных сигналов.

Так как на элементы И (&n) поступают два управляющих сигнала (с УУ1 и УУ2), то данные элементы открываются и с выходов этих элементов поступают управляющие сигналы на управляющие элементы УЭ1-УЭ8. В этот момент управляющие элементы УЭ1-УЭ8 закрываются и с их выходов сигналы на ключи Кл9 и Кл10 не поступают, а поступают через третий выход управляющего элемента УЭ на линии задержки ЛЗ1-ЛЗ8. Таким образом, сигнал будет передаваться по цепи ЛЗ-УЭ до тех пор, пока одно из управляющих устройств не освободится. Как только хотя бы одно из управляющих устройств УУ1 или УУ2 освобождается, элементы &n закрываются и сигналы с управляющих элементов УЭ1-УЭ8 поступают на управляющее устройство УУ1 напрямую, либо на управляющее устройство УУ2 через ключи Кл1-Кл8, если занято управляющее устройство УУ1.

Коммутатор 8×8 представлен в виде двудольного графа (Рис.15) и описан следующими множествами: $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8\}$ - множество входов коммутатора; $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8\}$ - множество выходов коммутатора; $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8\}$ - множество линий задержки на входах коммутатора; $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$ - множество линий задержки на выходах коммутатора; $C = \{c_1, c_2\}$ - множество коммутационных элементов; $Q_1 = \{1,0\}$ -множество состояний первого коммутационного элемента (1-занят; 0-свободен); $Q_2 = \{1,0\}$ -множество состояний второго коммутационного элемента (1-занят; 0-свободен); $Q_3 = \{1,0\}$ -множество состояний выходных линий задержки (1-занят; 0-свободен). На входные полюсы подается множество входных переменных $X = \{x_k\}$, где $x_k = \{\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k, \lambda_p\}$, $i = 1,2; j = 1,2; k = 1,2$.

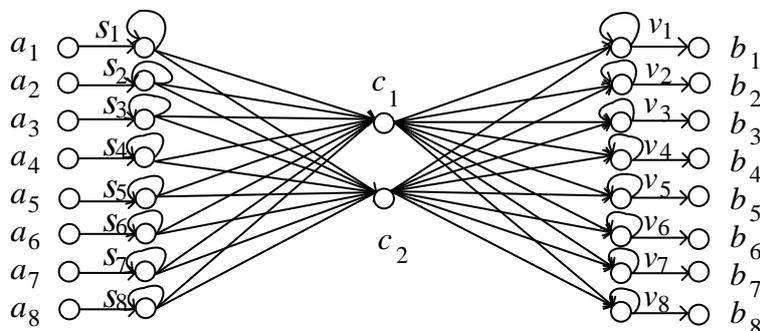


Рис. 15- Коммутационный граф 8×8

Функция состояния входов a_i в момент времени t определяется по формуле (1), где $i = 1, 2, \dots, 8$. Для описания алгоритма работы коммутатора 8×8 (Рис.16) введены следующие функции.

Функции состояния первого и второго коммутационных элементов (КЭ) c_1 и c_2 $f_1(t)$ и $f_2(t)$ соответственно:

$$f_1(t) = \begin{cases} 1, & \text{если КЭ занят в момент времени } t \\ 0, & \text{если КЭ свободен в момент времени } t \end{cases} \quad (18)$$

$$f_2(t) = \begin{cases} 1, & \text{если КЭ занят в момент времени } t \\ 0, & \text{если КЭ свободен в момент времени } t \end{cases} \quad (19)$$

Функция состояния оптического интегрального устройства:

$$f_3(t) = \begin{cases} 1, & \text{если КЭ занят в момент времени } t \\ 0, & \text{если КЭ свободен в момент времени } t \end{cases} \quad (20)$$

Функции распределения сигналов по входным $p_{1i}(t)$ и выходным $p_{2i}(t)$ линиям задержки с номером i :

$$p_{1i}(t) = \begin{cases} x_k(a_i, t), & \text{если } \begin{cases} f_1(t) = 1 \\ f_2(t) = 1 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} f_1(t) = 0 \\ f_2(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

$$p_{2i}(t) = \begin{cases} x_k(a_i, t), & \text{если } \begin{cases} f_3(t) = 1 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} f_3(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

Функция $p_{1i}(t)$ принимает значение сигнала $x_k(a_i, t)$, если в данный момент времени t на вход a_i поступает входной сигнал, а оба коммутационных элемента c_1 и c_2 заняты для передачи предыдущих сигналов. Эта функция принимает нулевое значение, если в данный момент времени t на вход a_i не поступает входной сигнал, или хотя бы один из коммутационных элементов c_1 и c_2 свободен. Другими словами, функция описывает условия, при которых входной сигнал поступает в соответствующую линию задержки. Функция $p_{2i}(t)$ принимает значение сигнала $x_k(a_i, t)$, если в данный момент времени t на вход a_i поступает входной сигнал, а выходное оптическое интегральное устройство занято для передачи предыдущих сигналов. Эта функция принимает нулевое значение, если в данный момент времени t на вход a_i не поступает входной

сигнал или оптическое интегральное устройство свободно. Другими словами, функция описывает условия, при которых входной сигнал поступает в выходную линию задержки.

Функция формирования канала связи в момент t имеет вид:

$$S_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \begin{cases} p_{1i}(t) = 0 \\ p_{2i}(t) = 0 \\ g(x_k(t), a_i, t) = 1 \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} p_{1i}(t) = 1 \\ p_{2i}(t) = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

Т. е. функция $S_i(t)$ принимает единичное значение, если в данный момент времени t n -й канал от входа a_i к выходу b_j свободен и на вход a_i поступает входной сигнал, то есть свободен хотя бы один из коммутационных элементов и выходное оптическое интегральное устройство. В противном случае, n -й канал занят, и функция $S_i(t)$ принимает значение равное нулю. Таким образом, функция описывает условие формирования нового канала связи.

В некоторый времени t входной сигнал поступает на один из входов a_i , а в управляющем сигнале заложена информация о выходе b_j коммутатора. При этом функции $g(x_k(t), a_i, t)$ присваивается одно из двух возможных значений: $x_k(a_i, t)$ или 0 в соответствии с (1). Далее происходит определение занятости сначала первого коммутационного элемента, затем второго коммутационного элемента и находятся функции $f_{1i}(t)$ и $f_{2i}(t)$ в данный момент времени в соответствии с (18) и (19). Если оба коммутационных элемента заняты ($f_{1i}(t)=1$ и $f_{2i}(t)=1$), то сигнал поступает в соответствующую линию задержки c_i , а функции $p_{1i}(t)$ присваивается значение $x_k(a_i, t)$ (21). Если же канал свободен, то $p_{1i}(t) = 0$. В случае если из коммутационных элементов свободен, то есть $f_{1i}(t) = 0$ или $f_{2i}(t) = 0$, то по набору значений управляющих сигналов λ_i , λ_j и λ_k происходит определение номера выхода коммутатора b_j . Так первому выходу соответствует комбинация $\{0\ 0\ 0\}$, второму – $\{0\ 0\ \lambda_3\}$, третьему – $\{0\ \lambda_2\ 0\}$, четвертому – $\{0\ \lambda_2\ \lambda_3\}$, пятому – $\{\lambda_1\ 0\ 0\}$, шестому – $\{\lambda_1\ 0\ \lambda_3\}$, седьмому – $\{\lambda_1\ \lambda_2\ 0\}$ и восьмому – $\{\lambda_1\ \lambda_2\ \lambda_3\}$. После этого устанавливается канал связи между входом a_i и выходом b_j , а функции $S_i(t)$ присваивается значение единицы. Далее по установленному каналу связи поступает полезная информация.

На основе коммутатора 8×8 построен коммутатор 64×64 (Рис.17).

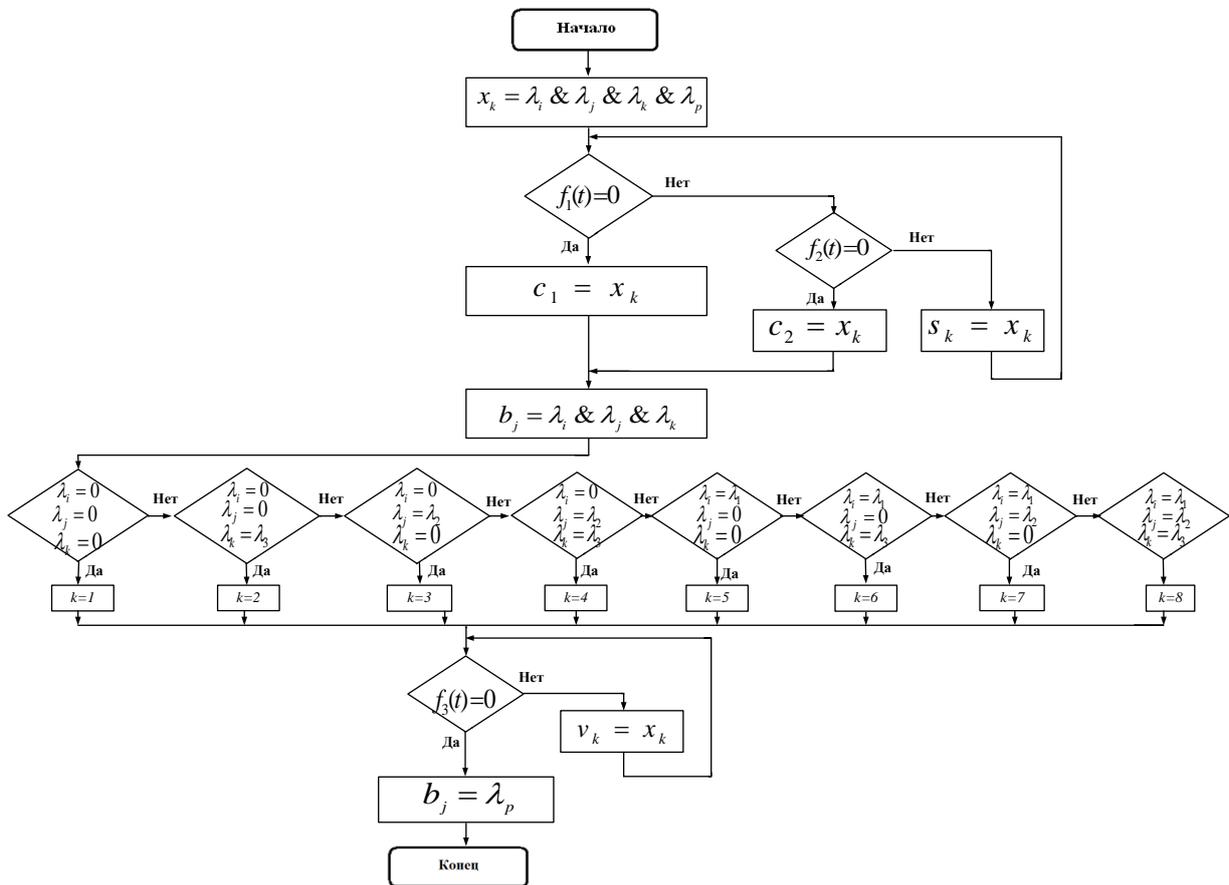


Рис.16– Блок-схема алгоритма работы коммутатора 8×8

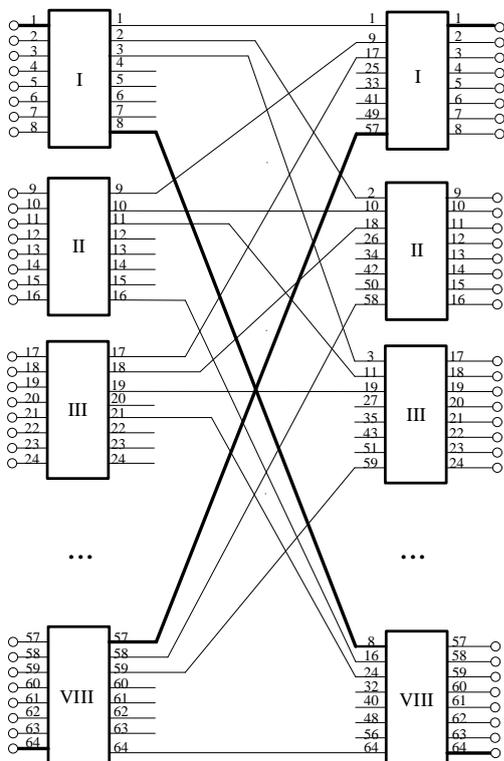


Рис. 17- Схема фотонной коммутационной системы 64×64

Аналогично методике, представленной во второй главе, разработаны математические модели для расчета схемной и коммутационной сложности, а также диаметра фотонных коммутационных систем, основанных на коммутаторах 8×8:

$$s_k = \frac{N_k}{24} \log_2 N_k; S_k = 2N_k \log_2 N_k,$$

$$k = \frac{1}{3} \log_2 N_k.$$

Проведено сравнение сложности многокаскадных схем, основанных на элементах 4×4. Схемная сложность новых схем в 1,5 раза меньше схемной сложности систем, предлагаемых во второй главе.

Анализируя возможности применения первого подхода (глава

2 и глава 3) к построению многокаскадных схем большой емкости, следует отметить возрастание периода сигналов при увеличении числа входов. Это требует использования линий задержки большой емкости и может привести как к техническим трудностям реализации устройства, так и к снижению его быстродействия. Поэтому были предложены дополнительные подходы к расширению фотонных многокаскадных коммутаторов.

В четвертой главе описываются второй, третий и четвертый подходы к построению неблокируемых фотонных коммутаторов большой емкости.

Второй подход основан на использовании коммутаторов, разработанных во второй и третьей главах с малой задержкой и на методе инвариантного расширения произвольных системных сетей на основе квазиполного орграфа. Этот метод рассмотрен на примере неблокируемого коммутатора 4×4 К4 с коммутационной сложностью $S_1=32$ и периодом разрядов $T_1=4$ такта. Используя данный коммутатор, демультиплексоры Д4 и мультиплексоры М4, построен неблокируемый коммутатор 16×16 со

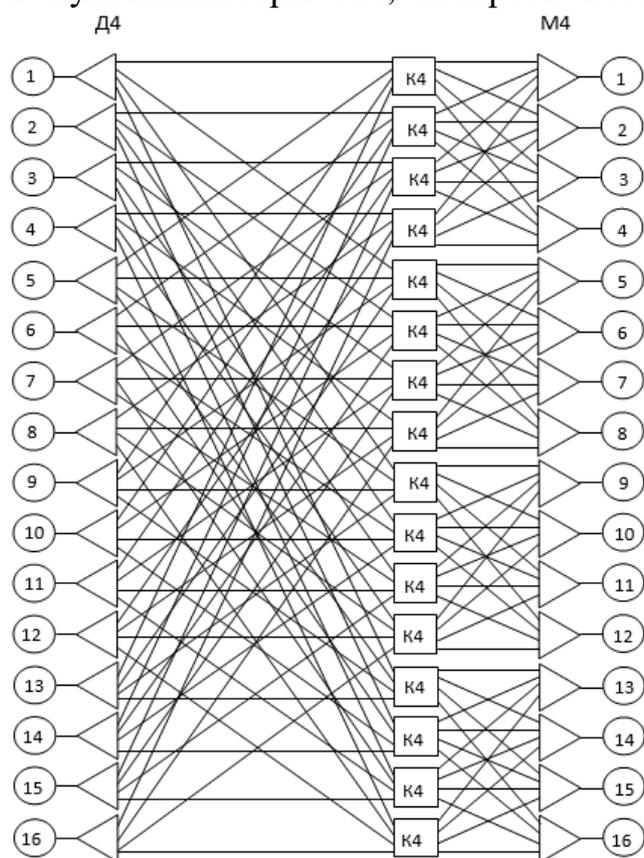


Рис.18- Коммутатор 16×16 на базе элементов 4×4 как квазиполный орграф

структурой квазиполного орграфа К16 с $16=4^2$ каналами и периодом разрядов 4 (Рис. 18). Он состоит из 16 коммутаторов К4 и 16 Д4 и М4. Поэтому его сложность определяется по формуле: $S_2 = N_2(S_1 + 2N_1) = 16(32 + 2 \cdot 4) = 640$.

Используя дополнительные демультиплексоры Д4 и мультиплексоры М4, коммутатор К16 можно расширить до неблокируемого коммутатора 64×64 К64 с $N_3 = 4^3$ каналами и периодом разрядов T_1 . Он состоит из 16 коммутаторов К16 и из 64 демультиплексоров Д4 и мультиплексоров М4 и его сложность равна:

$$S_3 = N_2 S_2 + 2N_3 N_1 = N_1 N_3 (S_1 + 2N_1 + 2) = 4 \cdot 64 \cdot (32 + 8 + 2) = 10752.$$

Еще раз используя Д4 и М4, коммутатор К64 можно расширить до неблокируемого коммутатора $N_4 \times N_4$ К N_4 с $256 = 4^4$ каналами и периодом разрядов T_1 . Он состоит из 16 коммутаторов К64 и из 256 Д4 и М4 поэтому

его сложность равна: $S_4 = N_2 S_3 + 2N_4 N_1 = N_4 N_1 (S_1 N_1 + 2N_1^2 + 2N_1 + 2) = 4 \cdot 256 \cdot (32 \cdot 4 + 2 \cdot 16 + 2 \cdot 4 + 2) = 174\,080$.

Математические модели для расчета сложности и диаметра k многокаскадных фотонных коммутационных систем $S_n(K)$, построенных по *второму подходу* в зависимости от числа входов в систему K и числа входов базового коммутатора N имеют вид:

$$S_n(K) = 2 \cdot N^{\log_2 K} \sum_{i=1}^{\log_2 \sqrt{K}} \frac{1}{N^{i-1}}$$

$$k = 2 \log_2 K$$

Многокаскадные коммутаторы средней сложности также строятся по принципу квазиполного орграфа, но с использованием базовых элементов 16×16 (Рис.7). При этом рассмотрены два варианта построения схем: на основе мультиплексоров/ демультиплексоров 4×1 М4 и 1×4 Д4 (*третий подход*, Рис. 19) и на основе мультиплексоров/ демультиплексоров 1×16 М16 и 16×1 Д16 (*четвертый подход*, Рис.20).

Коммутатор K_{16} на основе базового элемента КК4 из первого

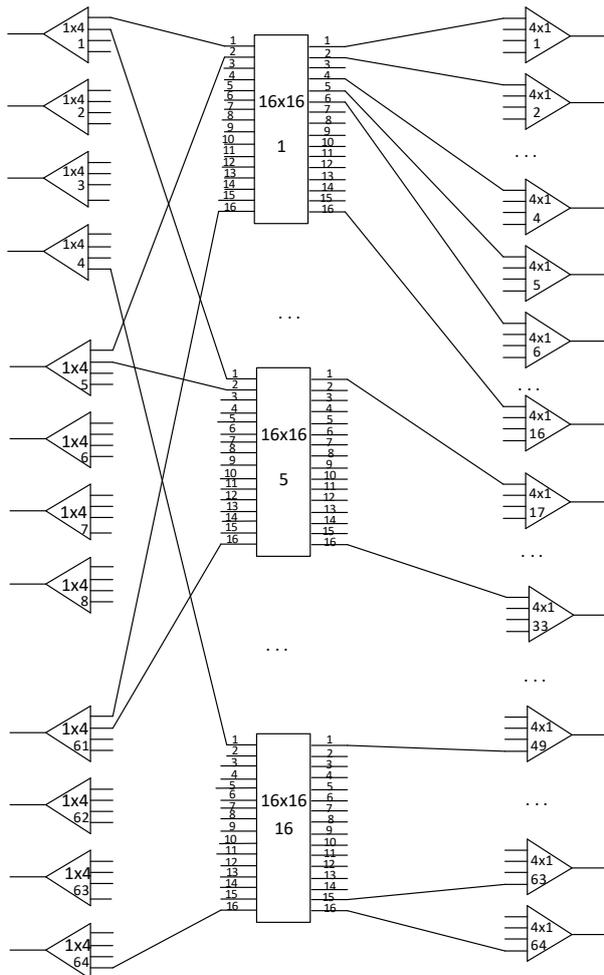


Рис. 19- Схема построения коммутатора K_{264} (третий подход)

подхода с $N_1 = 16$ имеет коммутационную сложность $S_1 = 256 = N_1^2$ и период $T_1 = 4 = N_1^{1/2}$. Схема построения коммутатора K_{264} на основе K_{16} по *третьему подходу* представлена на рисунке 19.

Коммутатор K_{264} также можно расширить до K_{3256} с $N_3 = 256$, используя внешние демультиплексоры Д4 и мультиплексоры М4. Он состоит из 16 K_{264} и 256 Д4 и 256 М4 и его коммутационная сложность S_3 определяется по формуле: $S_3 = N_1^4 (1 + 2/N_1 + 8/N_1^2) = 75776$.

Аналогично рассчитана сложность коммутаторов K_41024 , K_54096 , K_616384 и т.д.

Математические модели для расчета сложности $S_n(K)$ и диаметра k фотонных коммутационных систем,

построенных в соответствии с *третьим подходом*, имеют вид:

$$S_n = N^{\log_2 \sqrt{K}} \cdot \left(\frac{1}{2} + \sum_{i=1}^{\log_2 \sqrt{K} - 1} \frac{2^{2i-3}}{N^{i-1}} \right) \quad k = 2 \log_2 \sqrt{K}$$

Коммутационная сложность коммутатора K_2256 , построенного по *четвертому подходу* (Рис.20), будет определяется по формуле: $S_2 = N_1^4 (1 + 2/N_1) = 73\,728$. Аналогично рассчитана сложность коммутаторов K_34096 , K_465536 и т.д.

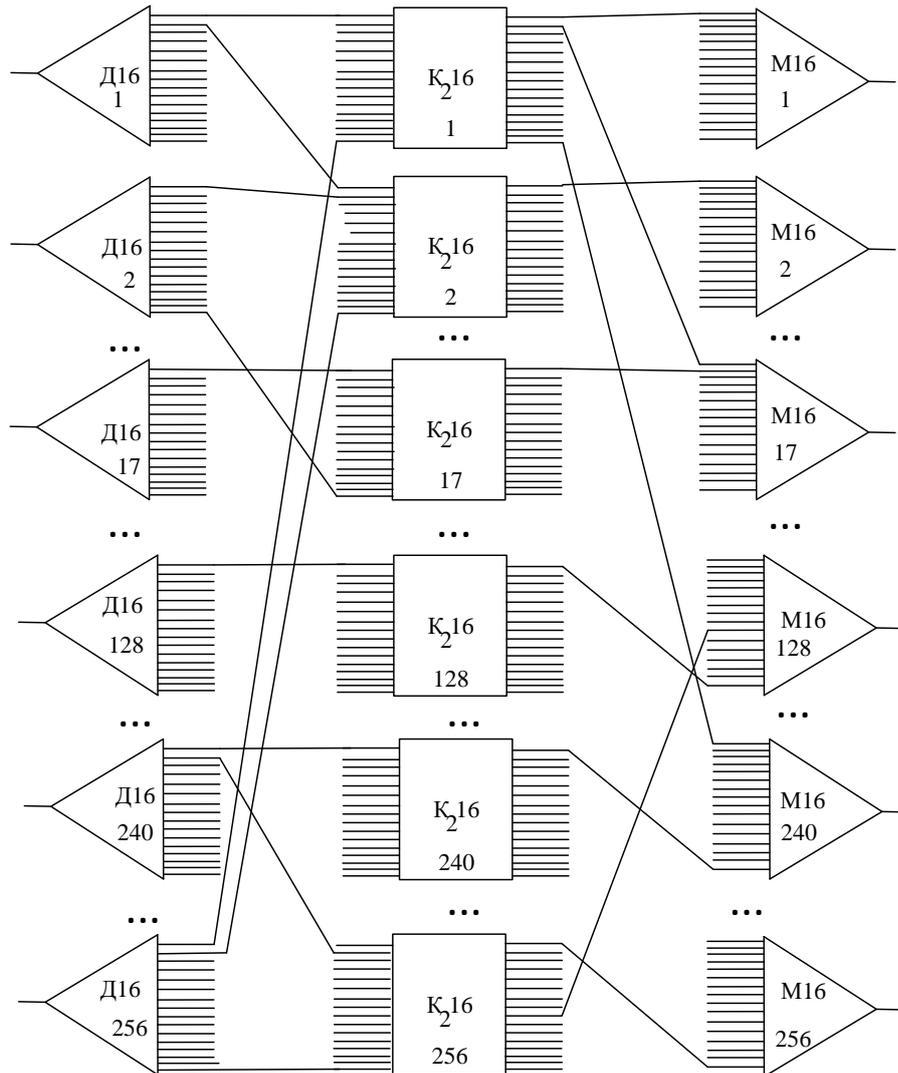


Рис. 20- Схема построения коммутатора K_2256

Математические модели для расчета коммутационной сложности и диаметра коммутаторов, построенных по *четвертому подходу* имеют вид:

$$S_n(K) = N^{\frac{\log_2 K}{2}} \left(\sum_{i=1}^{\frac{\log_2 K}{4}} \frac{2}{N^{i-1}} - 1 \right) \quad k = \frac{\log_2 K}{2} + 2$$

Проведено сравнение сложности (Рис.21) и быстродействия (периода сигналов T) коммутаторов с одинаковым числом входов для четырех подходов.

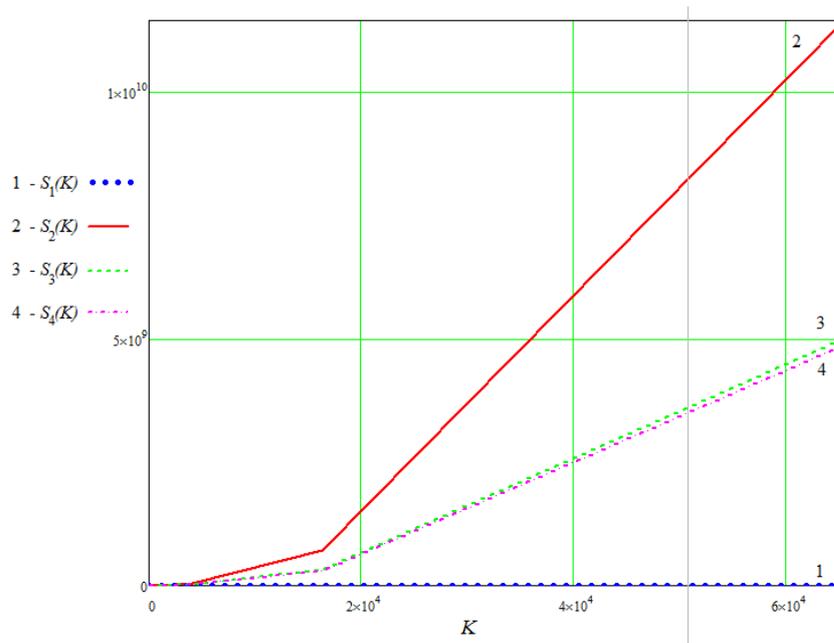


Рис. 21 – Зависимости коммутационных сложностей фотонных систем, построенных по четырем подходам

Первый подход позволяет строить системы с малой сложностью, которая сопоставима со сложностью блокируемых систем, но дает и малое быстродействие – в лучшем случае $T = K$, где K - число входов. Вторым подходом позволяют строить коммутационные системы с максимальным быстродействием, но их сложность существенно больше сложности полного коммутатора $S \gg K^2$. Третий и четвертый подходы являются наиболее оптимальными для построения неблокируемых коммутаторов с числом входов более 256 по критериям быстродействие/сложность, так как при том же самом значении периода сигналов $T=4$ их сложность является сопоставимой со сложностью полного коммутатора $S=N^2$.

Проведено сравнение сложностей перестраиваемой неблокируемой схемы Клоза и разработанных фотонных коммутационных систем. Для трехкаскадной схемы Клоза, с числом входов $N_1 = m^2$, сложность $S_1 = 6m^3 = 6N_1^{3/2}$, где m – число входов в коммутационный блок первого каскада. Например, при $m = 4$ и $N_1 = 16$ $S_1 = 6 \cdot 64 = 384 = N_1^{2,15}$ с периодом разрядов $T_1 = 1$; при $m = 16$ и $N_2 = 256$ $S_2 = 6 \cdot 4096 = 24576 = N_2^{1,86}$ с периодом разрядов $T_2 = 1$. Несмотря на меньший период разрядов, в схеме Клоза все перестроения реализуются в виде специального алгоритма установления соединений во внешнем устройстве управления, что на порядок снижает быстродействие коммутационной системы.

По значению сложности (Рис.22), коммутаторы Клоза (график 3) занимают промежуточное положение между фотонными коммутаторами, построенными по первому (график 1) и четвертому (график 2) подходам.

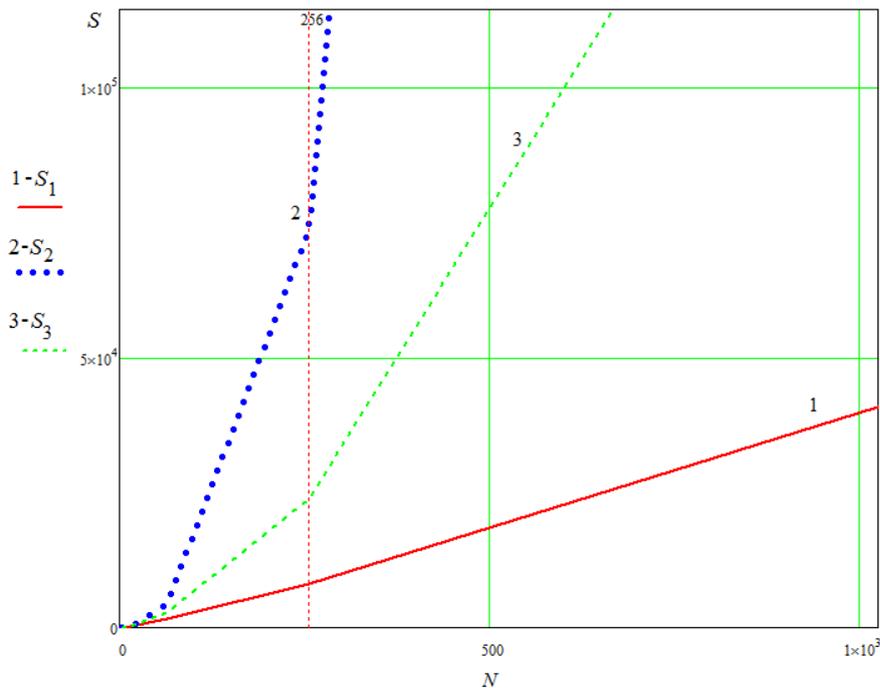


Рис. 22 – Зависимости сложности предлагаемых фотонных коммутационных систем и трехкаскадной схемы Клоза

Таким образом, свойство неблокируемости фотонных коммутаторов, функционирующих без внешнего управляющего устройства, достигается либо путем приемлемого увеличения сложности коммутационной схемы, либо за счет увеличения времени задержки сигналов. В частности, для фотонного коммутатора 256×256 с задержкой сигналов в 4 такта, сложность разработанных схем по сравнению со схемой Клоза возрастает в три раза, в то же время фотонный коммутатор 256×256 с задержкой сигналов в 49 тактов обладает сложностью в три раза меньшей сложности трехкаскадной схемы Клоза.

В пятой главе рассмотрены физические основы построения и функционирования элементов коммутационных систем, описанных в предыдущих разделах. Показано, что практическая реализация предлагаемых схем возможна с использованием существующих технологий. Построены физико-математические модели узлов этих схем и произведена оценка их быстродействия.

Рассмотрены различные варианты реализации новых отклоняющих систем 1×4 и 1×8 , обеспечивающих необходимое пространственное разнесение каналов связи и исключающих ложное срабатывание устройства. Проведен расчет и анализ фильтров Брэгга для разработанных коммутационных систем, обеспечивающих необходимую селекцию информационного и управляющих сигналов. Описаны физические основы и приведены численные расчеты параметров оптического частотного детектора.

Для стабильной работы фотонной коммутационной системы информационные и управляющие сигналы должны подаваться одновременно, но на разных частотах. На примере коммутационной системы 16×16 выбраны необходимые длины волн и длительности сигналов таким образом, чтобы их спектры располагались в окне прозрачности современных оптических волокон и при этом обеспечивалось их достаточное разнесение по длине волны (Рис.23).

Были проведены многочисленные расчеты и выбрана оптимальная структура фильтра Брэгга, который представляет собой 17 двухслойных периодов изотропных нанопленок на диэлектрической подложке.

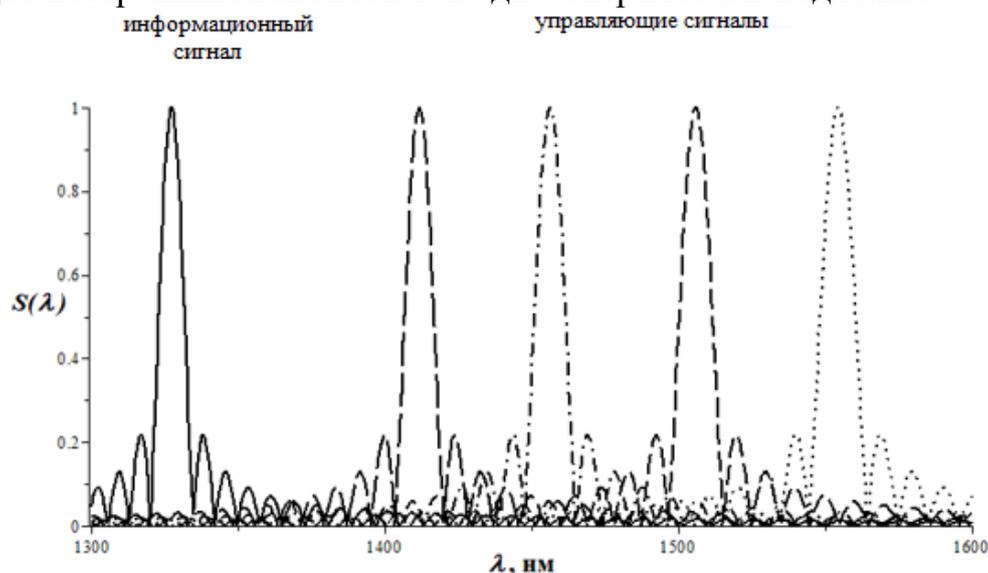


Рис. 23 - Спектры информационного и управляющих сигналов коммутационной системы 16×16

Первый фильтр (Рис.24) пропускает управляющие сигналы на длинах волн 1510нм и 1560нм и отражает информационный сигнал на длине волны 1330нм, а также управляющие сигналы на частотах 1420нм и 1460нм. Второй фильтр пропускает управляющие сигналы на длинах волн 1420нм и 1460нм и отражает информационный сигнал на длине волны 1330нм.

Была исследована структура оптического частотного детектора для решаемых в работе задач и произведен расчет его параметров (Рис.25). Частотный детектор преобразует частоту управляющих сигналов на длинах волн 1420нм, 1460нм, 1510нм, 1560нм и обеспечивает необходимую для фотодиода разницу уровней сигнала на выходе. Для этого выбрана пятислойная пластина с толщиной слоев 1мм.

Результаты расчета показали, что при одинаковом уровне сигналов на входе, разность уровней сигналов на выходе составляет не менее 1,27дБ, что достаточно для срабатывания современных фотодиодов.

Разработаны принципиально новые отклоняющие системы 1×4 (Рис. 26) и 1×8 , лежащие в основе функционирования фотонных коммутационных систем.

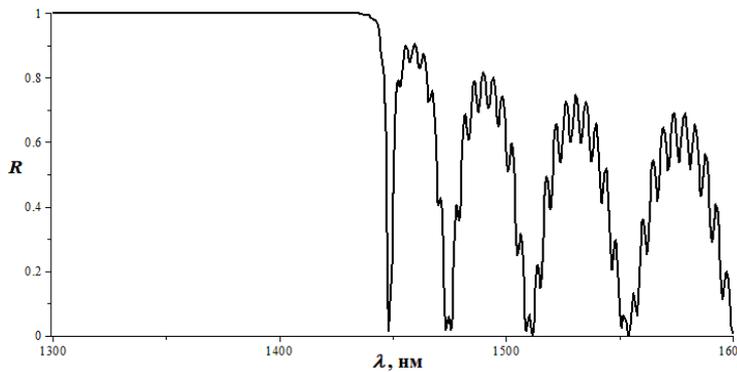


Рис. 24- Амплитудно-частотная характеристика фильтра Брэгга первого каскада

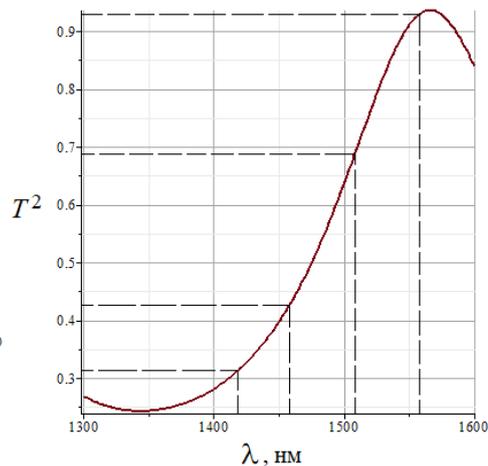


Рис. 25- Зависимость коэффициента прохождения по мощности от длины волны сигнала для частотного детектора

Для пространственного разнесения сигналов в предлагаемых отклоняющих системах используются свойства управляемых материалов – изменение показателя преломления при воздействии управляющего поля. Впервые для увеличения пространственного разнесения сигналов в многослойной структуре отклоняющей системы, работающей на

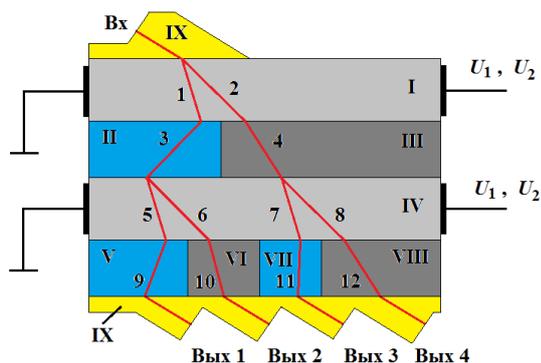


Рис. 26 - Схема отклоняющей системы 1×4

прохождение, предлагается использовать слои метаматериала. В простейшем случае данная отклоняющая система представляет собой четырехслойную структуру. Слои I и IV являются сегнетоэлектриком. Слои II, V, VII являются метаматериалом, слои III, VI, VIII – обычным диэлектриком, IX – согласующие диэлектрические слои. Управление направлением

прохождения информационного сигнала осуществляется электрическим полем, создаваемым внешними приложенными напряжениями U_1 и U_2 . Материальные параметры каждого из диэлектрических слоев и слоев метаматериала должны быть различными и обеспечивать необходимое пространственное разнесение информационного сигнала.

Важнейшей задачей при проектировании фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения является обеспечение достаточного уровня сигнала. Очевидно, что наибольшие

потери его мощности происходят за счет явления отражения от границ раздела структур и поглощения в этих структурах. Так как разработанные базовые коммутаторы содержат 4 или 8 входов, а вход в

отклоняющую систему всего один, то было предложено устройство – оптический мультиплексор, которое мультиплексирует сигналы с четырех (восьми) входов коммутатора на один вход отклоняющей системы.

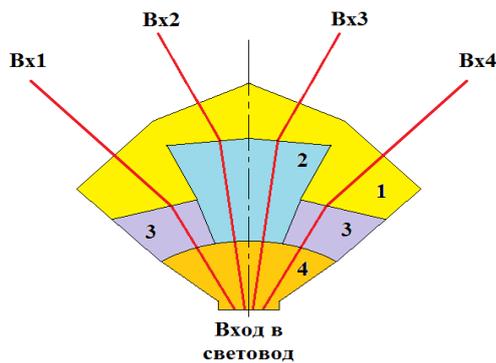


Рис. 27- Оптический мультиплексор

Оптический мультиплексор представляет собой неоднородную оптическую структуру сложной геометрии на основе диэлектрического изотропного материала и/или метаматериала (Рис. 27). Здесь 1 – это согласующий слой с диэлектрической проницаемостью ε_1 , служащий для уменьшения отражения в местах соединения мультиплексора с внешними оптическими цепями; слой 2 – преломляющий с диэлектрической

проницаемостью $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, служащий для изменения направления луча; слой 3 – согласующий с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_3 < \varepsilon_2$, служащий для уменьшения отражения в месте соединения с отклоняющей системой.

Так как отклоняющая система представляет собой многослойную структуру, содержащую как изотропные, так и анизотропные слои, то необходимо было рассчитать коэффициенты отражения в каждом из таких слоёв. Для изотропного слоя (диэлектрика) коэффициенты отражения и прохождения находятся по следующим формулам:

$$R = \frac{\rho_0 m_{11} \cos \alpha + \rho_0^2 m_{12} + m_{21} \cos^2 \alpha - \rho_0 m_{22} \cos \alpha}{\rho_0 m_{11} \cos \alpha + \rho_0^2 m_{12} + m_{21} \cos^2 \alpha + \rho_0 m_{22} \cos \alpha} \quad (24)$$

$$T = \frac{2\rho_0 \cos \alpha}{\rho_0 m_{11} \cos \alpha + \rho_0^2 m_{12} + m_{21} \cos^2 \alpha + \rho_0 m_{22} \cos \alpha} \quad (25)$$

где $\rho_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ – волновое сопротивление вакуума, α – угол преломления, m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} – элементы матрицы преобразования многослойной структуры, связывающей между собой тангенциальные компоненты полей на границах этой структуры.

В случае прохождения оптического луча через анизотропные слои (ниобат лития) коэффициенты отражения для волн правой и левой поляризации ТЕ волны имеют вид:

$$R_{TE}^+ = \frac{H_{отр}^+}{H_{пад TE}} = \frac{jR_{11} + R_{21}}{2} \quad (26)$$

$$R_{TE}^- = \frac{H_{отр}^-}{H_{пад TE}} = \frac{-jR_{11} + R_{21}}{2}$$

где $H_{\text{пад TE}}$ и $H_{\text{отр}}^+$ - соответствует падающей и отраженным волнам правой поляризации, $H_{\text{отр}}^-$ - соответствует отраженной волне левой поляризации; $R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}$ – элементы матрицы отражения \mathbf{R} .

Формулы 24 и 25 используются для расчета коэффициентов отражения и прохождения в фильтре Брэгга, частотном детекторе и в слое диэлектрика отклоняющей системы. Формулы 26 используются для расчета коэффициентов отражения в управляемых слоях отклоняющей системы.

Одна из основных характеристик коммутационных систем, определяющих ее быстродействие, является задержка сигнала в устройствах системы. Она определяется как время с момента поступления информационного разряда оптического сигнала на вход элемента коммутации до момента появления этого разряда на выходе устройства коммутации. В данном случае под устройством коммутации понимается базовый элемент фотонной коммутационной системы 4×4 . Была предложена методика расчета быстродействия фотонных коммутационных систем, согласно которой время задержки определяется следующими факторами: временем прохождения оптического сигнала в оптических структурах устройств; временем задержки сигнала на границах раздела сред и других неоднородностях; временем переходных процессов в цепях управляющего электрического (магнитного) сигналов; временем срабатывания электронных схем управления (фотодиоды, фототранзисторы, ректенны). Таким образом, время задержки рассчитывается по формуле:

$$t_z = \sum_{i=1}^N t_{\text{пр}i} + \sum_{j=1}^M t_{\text{рп}j} + \sum_{k=1}^K t_{\text{пнк}k} + \sum_{l=1}^L t_{\text{эвл}l} \quad (27)$$

где $t_{\text{пр}i}$ - время прохождения оптического сигнала в i -м устройстве схемы, $t_{\text{рп}j}$ - время задержки, определяемое сдвигом фаз на j -й границе раздела на пути прохождения светового излучения, $t_{\text{пнк}k}$ - время переходного процесса в k -й цепи управления, $t_{\text{эвл}l}$ - время срабатывания l -й схемы управления.

Для оценки быстродействия разработанных оптических коммутационных систем произведен расчет задержки сигнала в каждом из устройств системы. Самая большая задержка сигнала наблюдалась в результате переходных процессов в цепях управления и по результатам расчетов составила $\approx 1.5 \cdot 10^{-12}$ с. Согласно графикам зависимости времени задержки от толщины слоя ниобата лития и приложенного напряжения при угле падения 30° (Рис.28а) и времени задержки от угла падения и приложенного напряжения при толщине слоя 1мкм (Рис.28б) видно, что время задержки при прохождении через слои отклоняющей системы является существенным только при больших толщинах слоев. Из представленного графика также можно сделать вывод о том, что при

изменении напряжения от 0 до 1В и изменении толщины слоя от 0 до 0.1мм время прохождения луча изменяется от 0 до 1.7пс, а при толщинах слоев порядка 1мкм время прохождения луча в слое ниобата лития составляет сотые доли пикосекунд.

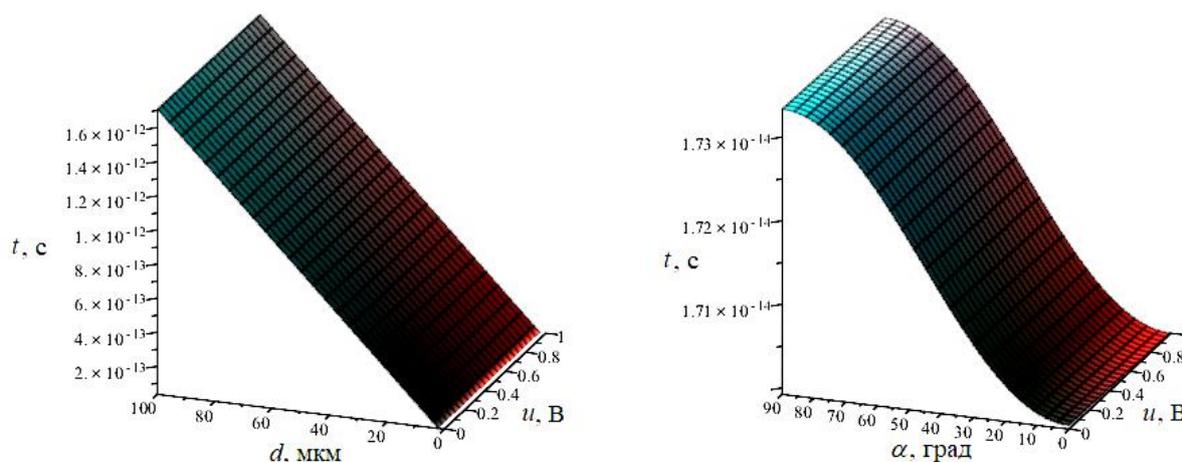


Рис. 28 – Зависимость задержки сигнала в ниобат литиевой пластине
 а) от напряжения и толщины слоя б) от напряжения и угла падения

Общее время задержки при прохождении сигнала через четырехслойную пластину составило $1.6 \cdot 10^{-13}$ с. По формуле (27) была рассчитана суммарная задержка сигнала в отклоняющей системе, которая составила $2.27 \cdot 10^{-12}$ с.

По аналогичной методике было рассчитано время задержки в остальных устройствах элемента коммутации. Результирующее расчетное время задержки сигнала в этом элементе не превысило $3 \cdot 10^{-12}$ с. Таким образом, быстродействие предлагаемых фотонных коммутационных систем с распределенным управлением и статической маршрутизацией не превышает единиц пикосекунд и на порядок выше быстродействия существующих оптических коммутационных систем.

В заключении перечислены наиболее важные выполненные исследования и сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Важнейшим результатом работы является научное обоснование решения проблемы создания фотонных коммутационных систем для повышения пропускной способности систем телекоммуникаций при переходе к сетям связи нового поколения 5G и 6G. При решении проблемы получены следующие результаты:

1. Разработаны методы построения неблокируемых фотонных коммутационных систем, предназначенных для обработки больших объемов данных и являющихся перспективными для применения в сетях связи нового поколения. В основе предлагаемых фотонных коммутаторов лежит разработанный метод параллельной поразрядной передачи

управляющих и информационного сигналов, разделенных по частоте, позволяющий коммутировать сигналы без внешнего электронного управляющего устройства, что на порядок повышает быстродействие коммутационных систем.

2. Разработаны новые схемы, математические модели и алгоритмы работы коммутационных систем со статической маршрутизацией и распределенным управлением размерностью 4×4 , 16×16 , 8×8 , 64×64 , 256×256 , позволяющие проводить расчеты и оценку схемной и коммутационной сложности неблокируемых фотонных коммутационных систем сетей связи нового поколения и обеспечивающие неблокируемую высокоскоростную параллельную поразрядную передачу оптических сигналов без использования внешнего управляющего устройства.

3. Разработана методика расчета сложности предлагаемых фотонных коммутационных систем, представлены соответствующие математические модели и проведена численная оценка данных параметров в зависимости от числа входов. По результатам сравнения сделан вывод о том, что сложность разработанных фотонных коммутационных систем 256×256 в 8 раз меньше сложности полного коммутатора и сопоставима со сложностью блокируемых коммутационных систем.

4. Дополнительно предложены три подхода к построению фотонных многокаскадных коммутационных систем большой емкости с применением метода инвариантного расширения произвольных системных сетей на основе квазиполного орграфа, обеспечивающие строгую неблокируемость при увеличении быстродействия. Для системы 256×256 быстродействие увеличилось в 12 раз.

5. Предложены принципиально новые отклоняющие системы 1×4 и 1×8 со слоями метаматериала для увеличения пространственного разнесения сигналов, что позволяет использовать их для построения неблокируемых базовых элементов 4×4 и 8×8 , и применять для разработки фотонных многокаскадных коммутационных систем, диаметр которых в 3 раза меньше диаметра известных схем.

6. Показано, что реализация предлагаемых коммутационных систем возможна на основе существующих на сегодняшний день технологий. Для этого рассмотрены физические принципы работы оптических устройств, лежащие в основе разработанных фотонных коммутационных систем: оптического фильтра Брэгга, оптического частотного детектора, принципиально новых отклоняющих систем, формирователя управляющего сигнала на основе ректенны. Разработаны физико-математические модели соответствующих устройств с учетом параметров их структур, а также коэффициентов отражения и прохождения, получены аналитические соотношения для расчета величины пространственного

разнесения информационных и управляющих лучей и временной задержки сигналов в элементах фотонных коммутационных систем.

7. Предложена методика оценки быстродействия элементов предлагаемых фотонных коммутационных систем. Результаты расчетов показали, что задержка в элементах схемы не превышает единиц пикосекунд, что на порядок выше быстродействия существующих оптических коммутационных систем с централизованным управлением.

8. Результаты работы апробированы и внедрены в различные организации и предприятия, о чем имеются соответствующие подтверждающие акты. Учебные варианты программного обеспечения используются в ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» и ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» при подготовке специалистов в области инфокоммуникационных технологий и систем телекоммуникаций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, индексируемые в SCOPUS/Web of Science

1. **Varabanova, E.A.** Electronic components for switching chips with parallel adjustment / E.A. Varabanova, N.S. Maltseva, I.O. Barabanov // Conference Proceedings - 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering.- 2014.-Vol.2.-6958245.- P. 204-211.
2. **Varabanova, E.** Data Processing Algorithm for Parallel Computing / E. Varabanova, I. Barabanov, N. Maltseva, I. Kvyatkovskaya // Communications in Computer and Information Science.-2014.-Vol. 466.- P. 61–69.
3. **Varabanova, E.** Computer-aided design software for buffer management in routers/ E. Barabanova, N. Maltseva, I. Kvyatkovskaya, I. Beresnev// Communications in Computer and Information Science.-2015.-Vol.535.- P. 160–168.
4. **Varabanova, E.** Methods and techniques of studying the core subjects in the direction of “information and communication technologies and communication systems / E. Barabanova, N. Maltseva, I. Sibikina, I. Kosmacheva, I. Kvyatkovskaya, V. Dmitriev, V. Esaulenko // Recent Patents on Computer Science.-2016.-Vol. 9.- Issue 2.-P. 166-172.
5. **Varabanova, E.A.** Switching cell for information transmission optical systems / I.O. Barabanov, N.S. Maltseva, E.A. Barabanova // Conference Proceedings - 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE.- P. 343-347.
6. **Varabanova, E.A.** Model of Next-Generation Optical Switching System / K. A. Vytovtov, E. A. Barabanova, V. S. Podlazov // Communications in Computer and Information Science.- 2018.- P. 377-386.
7. **Vytovtov, K.** Penetration effect in uniaxial anisotropic metamaterials / K.

- Vytovtov, E. Barabanova, S. Zouhdi // Applied Physics A: Materials Science and Processing.-2018.-Vol.124.- Issue 2.-137.-DOI:10.1007/s00339-018-1563-z.
8. **Barabanova, E.A.** Next-generation switching system based on 8x8 self-turning optical cell / K.A. Vytovtov, E.A. Barabanova, I.O. Barabanov // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE.- 2018.-P. 306-310.
 9. **Vytovtov, K.A.** Optical Switching Cell Based On Metamaterials And Ferrite Films / K. Vytovtov, E. Barabanova, S. Zouhdi // 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials 2018 Espoo, Finland, Aug. 27th – Sept. 1st.- 2018.- P.424-426.
 10. **Vytovtov, K.** Unusual penetration effect in ferromagnetics. Negative refraction under tangential wave incidence. / K. Vytovtov, E. Barabanova // Journal of Physics: Conf. Series 1092.-2018.- 012164.- DOI :10.1088/1742-6596/1092/1/012164.
 11. **Barabanova, E.A.** Models and algorithms of optical switching systems with decentralized control / E.A. Barabanova, K.A. Vytovtov, N.S. Maltseva, O.V. Kravchenko, V.F. Kravchenko // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering.-2019.- 8657063 -P. 64-68.
 12. **Vytovtov, K.A.** Sliding Wave Propagation Over the Interface Between a Biaxial Anisotropic Medium and Vacuum / K.A. Vytovtov, E.A. Barabanova, O.V. Kravchenko, V.F. Kravchenko // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering.-2019.-8657256- P.890-895.
 13. **Barabanova, E.A.** Model and algorithm of next generation optical switching systems based on 8×8 elements/E.Barabanova, K.Vytovtov, V.Podlazov//Lecture Notes in Computer Science.- 2019.- Vol.11965.-P. 58-70.
 14. **Barabanova, E.A.** Model of optical non-blocking information processing system for next-generation telecommunication networks / E. Barabanova, K. Vytovtov, V. Podlazov, V. Vishnevskiy // Communications in Computer and Information Science.- 2019.- P.188-198.-DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4_16
 15. **Vytovtov, K.** Accurate mathematical model of two-dimensional parametric systems based on 2×2 Matrix / K. Vytovtov, E. Barabanova, V. Vishnevskiy // Communications in Computer and Information Science. -2019.-Vol. 1141.-P. 199-211.
 16. **Vytovtov, K.** Mathematical model of four-dimensional parametric systems based on block diagonal matrix with 2×2 blocks / K. Vytovtov, E. Barabanova // Communications in Computer and Information Science.-2019.- Vol.1141.- P.139-155.
 17. **Vytovtov, K.** The accurate mathematic model based on 2x2-matrix for anisotropic photonic crystals with metamaterial layers / K. Vytovtov, E. Barabanova, V. Vishnevskiy // 13th International Congress on Artificial

Materials for Novel Wave Phenomena, Metamaterials.- 2019.- 8900820.-P. X456-X458.

18. **Barabanova, E.A.** The control system elements of the new generation optical switching cell / E.A. Barabanova , K.A. Vytovtov, T.T. Nguyen // Journal of Physics: Conference Series//Journal of Physics: Conference Series.- 2019.-Vol. 1368.- Issue 2.- 022002.

19. **Vytovtov, K.** Physical foundation of optical smart antenna based on metamaterial and lithium niobate / K. Vytovtov, E. Barabanova, M. Igumnov // Journal of Physics: Conference Series.-2019.- Vol. 1368.- Issue 2.- 022038.

20. **Barabanova, E.A.** Model of delay lines control device for an all-optical switching system / E.A. Barabanova, K.A. Vytovtov, Nguyen T. Thanh, O.V. Kravchenko, V.F. Kravchenko / 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering.–2020.- P. 96-100.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Барабанова, Е.А.** Новый принцип построения оптических устройств обработки информации для информационно-измерительных систем / Е. А. Барабанова, К.А. Вытовтов, В.М. Вишневецкий, В.С. Подлазов // Датчики и системы. - №9 (239).–С.3-9. (RSCI)

2. **Барабанова, Е.А.** Дискретное имитационное моделирование алгоритма организации очереди в буфере маршрутизатора / Е.А. Барабанова, И.А. Береснев // Научный вестник НГТУ.- Том 58.- № 1.- 2015.-С. 135–148. - ISSN 1814-1196.

3. **Барабанова, Е.А.** Управление элементами коммутации в оптической системе с параллельным поиском каналов связи / Е.А. Барабанова, И.А. Береснев, И.О. Барабанов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. - 2017. № 1. – С. 89 – 97.

4. **Барабанова, Е.А.** Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объемов данных / Е.А. Барабанова // Научный вестник НГТУ.- №1(70).- 2018.- С. 7-18.

5. **Барабанова, Е.А.** Модель и алгоритм работы оптического коммутатора 4×4 / Е.А. Барабанова, К.А. Вытовтов, И.О. Барабанов, Н.С. Мальцева // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика.- 2019.- № 2.-С.48-54.

6. **Барабанова, Е.А.** Модель оценки сложности оптических коммутационных систем нового поколения / Е.А. Барабанова, К.А. Вытовтов, Ч.Т. Нгуен // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика.- 2019.- № 3.-С.34-43.

7. **Вытовтов, К.А.** Физические основы управляемой оптической антенны на основе ниобата лития / К.А. Вытовтов, Е.А. Барабанова, М.А. Игумнов

// Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика.- 2019.- № 3.-С.44-52.

Монографии

1. **Барабанова, Е.А.** Коммутационные системы с параллельной обработкой/ Е.А. Барабанова, Н.С. Мальцева. – Астрахань: АГТУ.- 2012. - 164с.
2. **Вытовтов, К.А.** Анизотропные и бианизотропные многослойные структуры. Математическое моделирование и физические свойства. / К.А. Вытовтов, Е.А. Барабанова // Астрахань: Сорокин Роман Васильевич.- 2019.-100 с.

Патенты

1. **Барабанова, Е.А.** Фотонная коммутационная ячейка / Е.А. Барабанова, К.А. Вытовтов, Н.С. Мальцева, И.О. Барабанов // Патент №179015 от 21.04.2018.
2. **Барабанова, Е.А.** Фотонная коммутационная ячейка на основе метаматериала. / Е.А. Барабанова, К.А. Вытовтов // Патент №186690 от 29.01.2019.
3. **Барабанова, Е.А.** Оптическая двухкаскадная коммутационная система. / К.А. Вытовтов, Е.А. Барабанова // Патент №185530 от 7.12.2018.
4. **Барабанова, Е.А.** Трёхкаскадная коммутационная система / В.В. Жила, Е.А. Барабанова, Н.С. Мальцева // Патент № 2359313 от 20.06.2009.

Свидетельства на программы для ЭВМ

1. **Барабанова, Е.А.** Имитационная модель оптической коммутационной системы. / К.А. Вытовтов, Е.А. Барабанова, В.А. Круглов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019661890 / Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.10.2019г.
2. **Вытовтов, К.А.** Моделирование поведения волн в гиротропных фотонных кристаллах / К.А. Вытовтов, Е.А. Барабанова, И.О. Барабанов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662973 / Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.10.2019г.