

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/55-230

Ссылка для цитирования этой статьи:

Багацкий К.А., Дрогайтцева О.В. Анализ современных типов и конструкций волоконно-оптических кабелей и их применение в системах связи // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2026. №1

УДК 621.315.21

DOI:10.24412/2541-9269-2026-1-31-37

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТИПОВ И КОНСТРУКЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Багацкий К.А., Дрогайтцева О.В.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, o.drogaytseva@gmail.com

ANALYSIS OF MODERN FIBER-OPTIC CABLE TYPES AND DESIGN AND THEIR APPLICATION IN COMMUNICATION SYSTEMS

Bagatsky K.A., Drogaytseva O.V.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, o.drogaytseva@gmail.com

Аннотация: настоящая работа посвящена углубленному исследованию актуальных типов и конструктивных решений, применяемых в волоконно-оптических кабелях (ВОК), а также рассмотрению их роли в современных системах связи. В условиях динамичного развития телекоммуникационной отрасли и прогрессирующего увеличения объемов передаваемой информации, физическая среда передачи данных приобретает первостепенное значение в инфраструктуре сетей. В работе проводится систематизация кабелей на основе их функционального назначения и особенностей конструкции, включая модульные, с плотным буфером и ленточные структуры. Особое внимание уделяется рассмотрению различий между одномодовыми и многомодовыми оптическими волокнами, а также анализу технологических решений, применяемых при организации линий связи с использованием подземной, воздушной и подводной прокладки. Целью исследования является предоставление аналитической базы для принятия обоснованных решений при выборе оборудования с целью оптимизации пропускной способности телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия передачи, одномодовый кабель, многомодовый кабель, конструкция, инфраструктура.

Abstract: this work is dedicated to an in-depth study of current types and design solutions used in fiber-optic cables (FOC), as well as an examination of their role in modern communication systems. In the context of the dynamic development of the telecommunications industry and the progressive increase in data transmission volumes, the physical transmission medium is acquiring paramount importance in network infrastructure. The work systematizes cables based on their functional purpose and design features, including loose-tube, tight-buffered, and ribbon structures.

Particular attention is paid to examining the differences between single-mode and multi-mode optical fibers, as well as analyzing technological solutions used in deploying communication lines via underground, aerial, and submarine installation. The aim of the research is to provide an analytical basis for making informed decisions when selecting equipment to optimize the bandwidth of telecommunication networks.

Keywords: fiber optic transmission line, single-mode cable, multimode cable, design, infrastructure.

Актуальность выбранной темы исследования обусловлена кардинальными изменениями, происходящими в современной телекоммуникационной индустрии. Современное общество характеризуется экспоненциальным увеличением объемов передаваемой информации. Этот феномен обусловлен широким распространением облачных вычислений, развитием технологий машинного обучения и искусственного интеллекта, ростом популярности видеоконтента высокого и сверхвысокого разрешения, а также активным внедрением сетей мобильной связи пятого поколения

В сложившейся ситуации физическая среда передачи данных, основным компонентом которой являются волоконно-оптические линии связи, становится одним из ключевых элементов инфраструктуры. Технические характеристики и эксплуатационная надежность кабельной продукции напрямую влияют не только на пропускную способность каналов связи, но и на экономическую эффективность всей сети. Переход к новым типам и конструкциям ВОК рассматривается как необходимая мера для преодоления ограничений, связанных с существующей инфраструктурой.

Целью данной работы является проведение комплексного сравнительного анализа конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик современных ВОК. Основная задача заключается в обосновании рационального выбора кабельной продукции для оптимизации пропускной способности и повышения надежности функционирования различных систем связи.

Оптический кабель представляет собой специализированный тип кабеля, предназначенный для передачи данных посредством модулированных световых сигналов. Ключевое отличие от традиционных медных кабелей заключается в использовании световых лучей в качестве носителя информации вместо электрического тока. Для этой цели применяются тонкие волокна из стекла или полимерных материалов, известные как оптоволокно. Эти волокна функционируют как волноводы, обеспечивая распространение сигналов на большие расстояния с минимальными потерями.

Существующее разнообразие типов кабелей может быть классифицировано на три основные группы: кабели повивной скрутки, кабели с профилированными сердечниками и плоские кабели ленточного типа (рис. 1). В настоящее время в индустрии используются две основные конструктивные разновидности оптических кабелей: кабели с содержанием металлических элементов (проводники, оболочки из свинца или алюминия) и полностью диэлектрические кабели, не содержащие металлических компонентов.

Преимуществом кабелей с металлическими элементами является повышенная механическая прочность. Медные проводники могут использоваться для организации служебной связи и дистанционного питания регенераторов. Диэлектрические кабели обладают меньшей механической прочностью и хуже защищены от воздействия грызунов, но обеспечивают более высокую устойчивость к электромагнитным воздействиям. Наружные оболочки, как правило, имеют многослойную структуру, включающую демпфирующий слой и защитную оболочку. Пространство между кабелем и защитной трубой заполняется гидрофобными влагостойкими компаундами, предотвращающими проникновение влаги. В качестве примера приведена конструкция оптического магистрального кабеля. Для использования в сетях сельской телефонной связи обычно применяются четырехволоконные кабели. Один из вариантов конструкции представляет собой монолитный пластмассовый сердечник с пазами, в которых размещены волокна. В центре сердечника располагается силовой элемент из проволоки. На поверхности сердечника находится стальная оплетка, поверх которой расположена защитная полиэтиленовая оболочка.

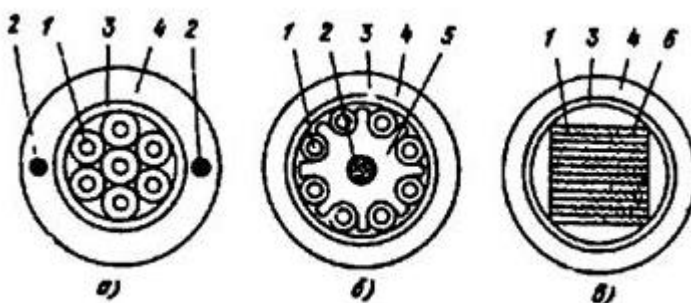


Рис. 1. Типовые конструкции оптических кабелей:

а) волновой скрутки; б) с профилированным сердечником; в) ленточного типа;

1 - оптические волокна; 2 - силовые элементы; 3 - внутренняя оболочка; 4 - полиэтиленовая оболочка; 5 - профилированный пластмассовый сердечник; 6 - лента с волокнами.

Оптическое волокно, входящее в состав кабеля, является одним из важнейших компонентов волоконно-оптической сети. Волокно представляет собой физическую среду, посредством которой осуществляется передача информации.

Первыми волокнами, получившими широкое распространение на линиях связи большой протяженности, были одномодовые волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и нулевой дисперсией на длине волны 1310 нм (G.652 в соответствии с классификацией ITU), представляющие собой стандартные одномодовые волокна (рис. 2). В 1980-х годах было проложено более 80 миллионов километров кабеля с использованием таких волокон. Несмотря на увеличение скоростей передачи данных и появление технологии спектрального уплотнения каналов (DWDM), позволяющей существенно увеличить пропускную способность уже проложенных кабельных линий, темпы прокладки кабеля в глобальном масштабе в обозримом будущем не снизятся

(Горлов, Н.И. и Богачков, И.В., 2009). Хотя стандартное волокно G.652 характеризуется нулевой хроматической дисперсией на длине волны 1310 нм, его дисперсия на длине волны 1550 нм является относительно высокой (18 пс/нм/км). На первый взгляд, это несовместимо с рабочим диапазоном оптических усилителей EDFA (1550 нм). Однако, как показали последние исследования, передача каналов DWDM с умеренной скоростью по волокну G.652 возможна на значительные расстояния без существенной деградации качества сигнала. Это достигается за счет использования отрезка специализированного волокна или других устройств компенсации дисперсии.

Производителями разработано волокно со смещенной дисперсией (G.653 в соответствии с классификацией ITU), которое характеризуется нулевой дисперсией на длине волны около 1550 нм (рис. 2). На этой длине волны затухание сигнала является более низким, чем на длине волны 1310 нм, что делает работу в диапазоне 1550 нм более предпочтительной, особенно для линий связи большой протяженности. Однако, волокно со смещенной дисперсией не всегда является лучшим вариантом для передачи каналов DWDM.

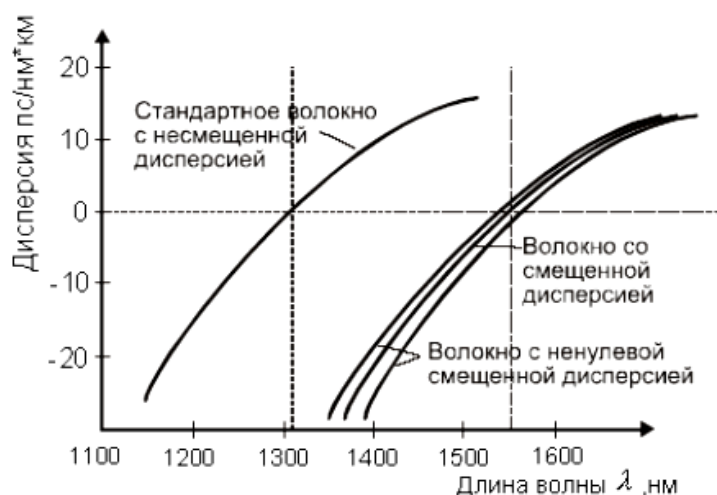


Рис. 2. Типичные значения дисперсии для различных типов оптических волокон

Для подавления нелинейных эффектов, в частности FWM, были разработаны волокна, в которых длина волны нулевой дисперсии выведена за пределы рабочего диапазона усилителей EDFA (1530–1565 нм) за счет использования специальных профилей показателя преломления (рис. 3) – волокна с ненулевой смещенной дисперсией (G.655 по классификации ITU).

В пределах рабочего диапазона EDFA-волокно G.655 имеет небольшую, хорошо контролируемую хроматическую дисперсию (от более чем 3 пс/(нм·км) на 1530 нм до менее чем 0,7 пс/(нм·км) на 1560 нм). Значение дисперсии является достаточным для подавления FWM и обеспечения передачи данных со скоростью не менее 2,5 Гбит/с на канал. Волокна G.655 оптимально подходят для использования в системах DWDM.

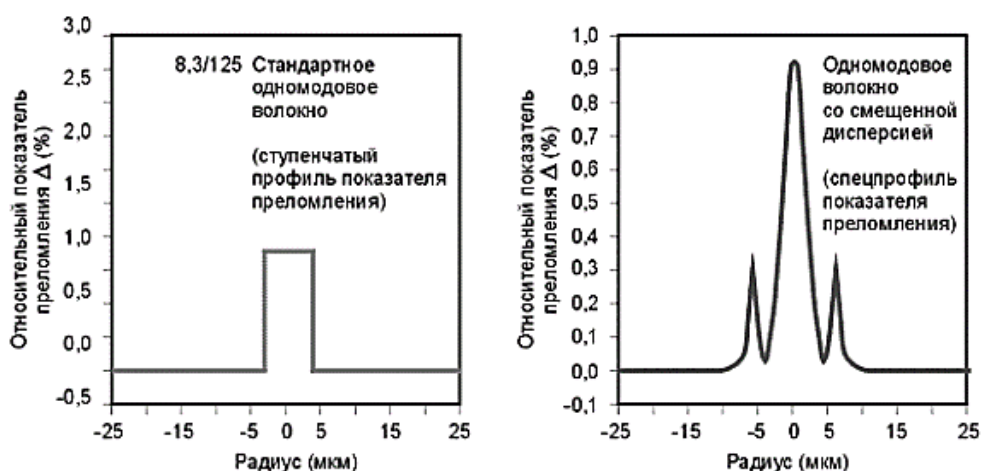


Рис. 3. Типичные профили коэффициента преломления для одномодовых оптических волокон

По функциональному назначению выделяются четыре основные категории кабелей:

- Магистральные линии связи: В данном сегменте преобладают кабели с числом волокон до 144–288, оптимизированные для работы в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм.
- Сети доступа и центры обработки данных (ЦОД): В данных сегментах критическим параметром является плотность упаковки волокон, что стимулирует разработку и внедрение ленточных конструкций.

По конструктивному исполнению выделяются три основных типа кабелей:

- Кабели с модульной конструкцией: В данной конструкции волокна свободно располагаются в полимерных трубках, заполненных гидрофобным гелем. Такая конструкция эффективно минимизирует воздействие механических растягивающих усилий непосредственно на волокно.
- Кабели с плотным буфером: Особенностью данного типа кабеля является наличие индивидуального полимерного покрытия диаметром 900 мкм у каждого волокна. Благодаря высокой гибкости они применяются преимущественно внутри зданий.
- Ленточные кабели: Волокна в таких кабелях объединены в плоские группы — ленты. Это технологическое решение позволяет достичь максимальной плотности размещения волокон в кабеле, до нескольких тысяч в одном кабеле.

Важным фактором при выборе кабельной продукции является тип используемого волокна, который определяется модой — элементарной составляющей, или отдельным лучом света, проходящим по волокну (рис. 4).

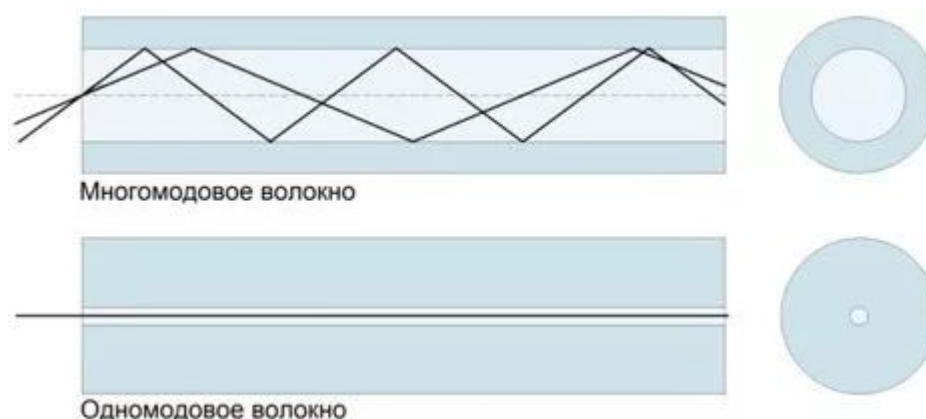


Рис. 4. Распространение мод излучения

- Одномодовые волокна: Отличаются маленьким диаметром сердцевины (~9 мкм). Они предназначены для передачи информации на дальние расстояния с высокой скоростью и минимальным затуханием сигнала.
- Многомодовые волокна: Имеют значительно больший диаметр сердцевины (50 мкм или 62.5 мкм). Используются на небольших расстояниях (до 550 м) с меньшей скоростью передачи данных и находят применение в локальных сетях и внутри центров обработки данных (ЦОД).

В настоящее время сложилась практика выбора оптического кабеля в зависимости от сферы применения.

Одномодовое волокно применяется:

- в морских и трансокеанских кабельных линиях связи;
- в наземных магистральных линиях дальней связи;
- в региональных линиях связи между городскими узлами, в выделенных оптических каналах большой протяженности, в магистральных линиях к оборудованию операторов мобильной связи;
- в системах кабельного телевидения;
- в системах GPON с доведением волокна до конечного пользователя;
- в структурированных кабельных системах (СКС), когда протяженность магистралей достигает 550 м и более (например, между зданиями);
- в СКС, обслуживающих ЦОД, независимо от расстояния.

Многомодовое волокно используется:

- в СКС, в магистральных линиях, проходящих внутри здания (как правило, протяженностью до 300 м) и в магистральных линиях между зданиями, если расстояние не превышает 550 м;
- в горизонтальных сегментах СКС и в системах FTTD (fiber-to-the-desk), где устанавливаются пользовательские рабочие станции с многомодовыми оптическими сетевыми картами;
- в ЦОД, в дополнение к одномодовому волокну;

- во всех случаях, когда расстояние позволяет применять многомодовые кабели. Основным критерием выбора является то, что многомодовые кабели обходятся дороже, но экономия на активном оборудовании компенсирует эти затраты.

Анализ методов прокладки кабеля выявил три основных подхода, зависящих от условий эксплуатации:

- Подземная прокладка: Осуществляется путем закапывания кабеля в грунт или прокладки через кабельную канализацию. Кабель либо укладывается в траншею с использованием кабелеукладчика, либо затягивается в существующие асбестоцементные или полимерные трубы.
- Воздушная прокладка: Представляет собой наиболее быстрый и экономичный способ развертывания сети. Кабель подвешивается на опорах линий электропередач (ЛЭП), уличного освещения или между зданиями.
- Подводное размещение: Требуется использование специализированных кабелей с усиленной двойной броней из стальной проволоки. Конструкция включает несколько слоев защиты из полиэтилена и алюминия. Важной особенностью является наличие в кабеле медных жил, необходимых для дистанционного питания подводных регенераторов (усилителей сигнала), устанавливаемых на расстоянии 50–100 км друг от друга.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что в условиях цифровой трансформации и перехода к сетям поколений 5G/6G выбор волоконно-оптического кабеля является стратегически важным фактором, определяющим развитие инфраструктуры связи. Данное исследование сохраняет высокую актуальность, так как надежность кабельной инфраструктуры напрямую определяет экономическую эффективность всей сети.

Литература

1. Боев М.А. Особенности технологии производства оптических кабелей: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 56 с.
2. Перин А.С., Шарангович С.Н. Проектирование оптических цифровых телекоммуникационных систем: Учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2019. 114 с.
3. Шахтанов С.В., Романов П.Н. Эксплуатация и техническое обслуживание волоконно-оптических кабельных линий связи. Практикум: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2024. - 200 с.
4. Горлов, Н.И., Богачков И.В. Волоконно-оптические линии передачи: методы и средства измерений параметров. М.: Радиотехника, 2009. 188 с.