

Раздел 1 СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ.

Потоки различных видов информации необходимо передать на большие расстояния с большой достоверностью. Важную роль при этом играет электрическая связь. В зависимости от передаваемой информации электрическая связь подразделяется на следующие виды: телефонную (передача речи); телеграфную (передача текста); фототелеграфную (передача неподвижного изображения); проводное вещание (передача музыкальных, речевых и других звуков); телевизионную (передача изображений движущихся объектов со звуковым сопровождением); видеотелефонную (телефонная связь, сопровождающая телевизионным изображением разговаривающих); передачу данных (передача цифровой информации для обработки ее в ЭВМ или уже обработанную ими. К этому виду также относится передача сигналов управления и контроля для автоматики и телемеханики).

1.1. Основные термины и определения

Любая система электросвязи может быть представлена в виде структурной схемы, представленной на рис. 1.1.

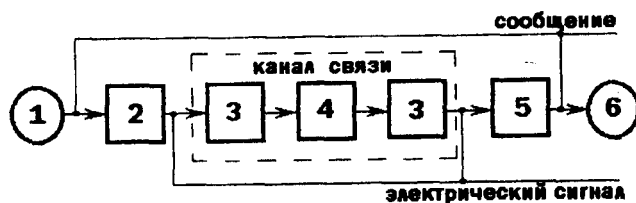


Рис. 1.1. Структурная схема системы электросвязи:

- 1 – источник информации;
- 2 – преобразователь информации в электрический сигнал;
- 3 – система передачи;
- 4 – среда (направляющая система);
- 5 – преобразователь электрического сигнала в информацию;
- 6 – потребитель информации

Источником и потребителем информации может быть человек, ЭВМ, устройство телемеханики или телеуправления и т.д. Преобразователями информации в сигнал и обратно могут быть: телеграфные и фототелеграфные аппараты, передающая и приемная ТВ-трубки и др.

Каналом электросвязи называют комплекс физических устройств и среду, при помощи которых электрические сигналы передаются из одного пункта связи в другой. Если распространение электромагнитной энергии (электрического сигнала) происходит в свободном пространстве (в диалектической среде), то канал связи называют радиоканалом (радиосвязь, релейная, спутниковая и лазерная связь). Если канал связи предполагает наличие границы раздела сред, вдоль которой канализируется электромагнитная энергия, то его называют проводным каналом. Проводные каналы создаются с помощью направляющих систем (линий связи), в качестве которых могут использоваться двухпроводные цепи (коаксиальные и симметричные), или волноводы (волоконно-оптические световоды). Двухпроводные симмет-

ричные цепи могут быть организованы как по низкочастотным кабелям городских и сельских телефонных сетей (ГТС и СТС), так и с помощью систем передачи (высокочастотные цепи), позволяющих по одной цепи одновременно передать значительное число информации одного или различных видов. Волоконно-оптические световоды, работающие в оптическом диапазоне волн, позволяют передать очень большие объемы информации.

Для обеспечения надёжной работы направляющие системы оснащают дополнительными элементами и устройствами, которые в совокупности носят название линейных сооружений связи. Совокупность линейных и станционных сооружений составляют единую систему - сеть электросвязи. Сеть электросвязи страны (СЭС) - комплекс технических средств электросвязи, взаимодействующих на основе определенных принципов и обеспечивающих возможности своевременно, качественно и полно удовлетворять все потребности населения страны, отраслей народного хозяйства, органов государственного управления и обороны, науки и просвещения, здравоохранения и культуры в разнообразных услугах связи.

Различают три основных типа линий связи: кабельные (КЛС), воздушные (ВЛС) и волоконно-оптические, основанные на использовании оптических кабелей (ВОЛС). Кабельные и воздушные линии относят к проводным линиям, у которых направляющие системы образуются системами проводник-диэлектрик, а в ВОЛС используют световоды (оптические волокна) - диэлектрические волноводы, направляющая система которых состоит из диэлектриков с различными показателями преломления.

1.2. Направляющие системы передачи.

Направляющая система - это устройство, предназначенное для передачи электромагнитной энергии в заданном направлении. Таким канализирующим свойством обладают проводник, диэлектрик и любая граница раздела сред с различными электрическими свойствами (металл - диэлектрик, диэлектрик - воздух и др.).

Роль направляющей системы могут выполнить металлическая линия (кабель, волновод), диэлектрическая линия из материала с диэлектрической проницаемостью $\epsilon > 1$ (диэлектрический волновод, волоконный световод), а также металло-диэлектрическая линия (линия поверхностной волны).

К группе симметричных цепей относят воздушные линии связи и симметричные кабели. Эти цепи состоят из двух проводников с одинаковыми электрическими и конструктивными свойствами. В коаксиальном кабеле проводник а концентрически расположен внутри проводника б, имеющего форму полого цилиндра. Внутренний проводник отделен от внешнего изоляцией из диэлектрика.

Первый вариант построения сети наиболее надёжен, но в технико-экономическом отношении не выгоден. Радиальная схема построения сети наиболее дешевая, но она не имеет путей резервированная.

Наилучшие результаты дает сочетание радиальной и узловой схем сети. Радиально-узловая схема построения сети позволяет создать разветвленную, устойчивую и в то же время довольно экономичную сеть связи. Она характеризуется тем, что одноименные узлы связи непосредственно соединяются линиями не только с ниже стоящими узлами, но и между собой.

Такое построение сети обеспечивает обходные связи по кратчайшим направлениям и позволяет получать два-три независимых выхода к любому узлу связи. Радиально-узловая схема обладает значительной гибкостью, маневренностью и живучестью.

По территориальному признаку первичные и вторичные сети электросвязи делятся на магистральные, внутрizonовые и местные.

Магистральная сеть соединяет каналами связи Москву с республиканскими, краевыми центрами и последние между собой по принципу «каждая с каждой». Внутрizonовая сеть соединяет областной (республиканский, краевой) центр с районными центрами по радиаль-

ному способу. При этом предусматриваются прямые связи между взаимотяготеющими районными узлами. Местную сеть составляют сельские сети, соединяющие райцентры с селами, и городские сети.

В состав местной, внутризоновой и магистральной первичных сетей входят: сетевые станции, сетевые узлы и линии связи. Линии связи в зависимости от первичной сети, которой она принадлежит, присваивается название магистральной, внутриобластной и местной кабельной, радиорелейной и спутниковой.

В соответствии с этим кабели связи называются магистральными, внутриобластными (Зоновыми), СТС, ГТС.

Сельские телефонные сети (СТС) строят по радиальноузловому принципу. При этом в райцентре устанавливают центральную станцию (ЦС), а в сельских населенных пунктах - оконечные станции (ОС). В свою очередь ЦС связаны с ЦС других районов и центром зоны.

Как правило, СТС строят по одноступенчатой схеме, предполагающей непосредственное соединение ЦС и ОС. Двухступенчатая схема связи включает: узловые станции (УС), расположенных между ЦС и ОС.

Городская телефонная сеть обеспечивает соединение абонентов города друг с другом, а также возможность их выхода на междугородную сеть через междугородную телефонную станцию (МТС).

Система построения ГТС зависит от количества абонентов сети. В соответствии с этим ГТС можно подразделить на три основных типа: сети районных центров и городов внутриобластного значения; сети областных центров и городов республиканского значения; сети крупных промышленно-административных центров.

Телефонные сети районных центров могут быть городского и сельского типов. Они состоят обычно из телефонной станции и линейных сооружений, соединяющих абонентов со станцией. В телефонную станцию включены местные (ведомственные) коммутационные установки и сельские телефонные станции. Также имеется междугородная телефонная станция.

Телефонные сети областных центров имеют значительно большее число абонентов, поэтому содержат несколько телефонных станций. Город делится на районы, в каждом из которых строят свою станцию. Районные станции соединяются друг с другом по принципу «каждая с каждой». Кроме того, каждая районная станция соединяется с междугородной станцией.

Телефонные сети крупных промышленно-административных центров имеют большое число районных телефонных станций, каждая из которых обслуживает определенную часть территории города. На этих сетях строят АТС емкостью до 10000, а иногда и более номеров. При большей емкости сетей (свыше 90000 номеров) соединение между отдельными районными АТС (РАТС) осуществляются через узловые АТС (УАТС). УАТС объединяет определенную группу РАТС, концентрируя исходящие или входящие сообщения этих РАТС. Отсюда название узлов - узел исходящего сообщения (УИС) или узел входящего сообщения (УВС).

На этих сетях связь между РАТС внутри узлового района осуществляется по принципу «каждая с каждой» или через свой узел входящего сообщения, а с РАТС другого района через УВС этих узловых районов. Кроме того, могут строиться районированные телефонные сети с совмещенными узлами исходящего и входящего сообщений.

Для выхода на междугородную сеть каждая РАТС соединяется через свою УАТС с МТС. По существующим нормам принято следующее распределение затухания разговорного тракта между абонентами ГТС (рис. 1.3).

На каждый городской участок отводится 8,7 дБ, а на междугородную линию 10,4 дБ. Общее затухание не должно превышать 27,8 дБ. На районированных сетях за счет перераспределения затухания для участка АТС-МТС увеличена норма с 2,2 до 3,9 дБ, а для междугородной линии сокращена до 7 дБ. Если оба абонента находятся в одном городе, то на соединительной линии между АТС допускается затухание 17,4 дБ.

Участок сети связи от телефонной станции до абонентских оконченных устройств называют «последней милей (Last Mile)» или семью абонентского доступа.

В настоящее время используются две основные системы построения сети абонентских линий: шкафная и бесшкафная. Шкафная система представлена на рис. 1.4,а. Включение абонентов в телефонную станцию осуществляется через распределительные коробки (РК), устанавливаемые на лестничных площадках домов, и распределительные шкафы (РШ), устанавливаемые, как правило, в подъездах зданий.

От телефонных станций в различных направлениях отходят крупные по емкости кабели, которые, разветвляясь на более мелкие, вводятся в распределительные шкафы. Эти кабели вместе с относящимся к ним линейным оборудованием составляют магистральную сеть ГТС. От распределительных шкафов отходят меньшие по емкости кабели (50... 100 пар), которые, разветвляясь, вводятся в распределительные коробки емкостью 10х2. Данные кабели и относящееся к ним оборудование составляют распределительную сеть ГТС. Магистральные и распределительные кабели в РШ заводят соответственно на магистральные и распределительные плиты. От распределительных коробок к телефонным аппаратам абонентов прокладываются однопарные кабели.

Раздел 2

КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

2.1. Классификация и конструктивные элементы электрических кабелей

Кабелем связи называется электротехническое изделие, содержащее изолированные проводники, объединенные в единую конструкцию и заключенные в общую металлическую или пластмассовую оболочку и защитные покровы.

Электрические кабели классифицируют по следующим признакам: область применения, спектр передаваемых частот, конструкция, условия прокладки и эксплуатации.

1. В соответствии с построением сети связи, в зависимости от области применения, кабели связи подразделяют на магистральные, зонавые (внутриобластные), местные (городские и сельские), станционные (внутриобъектные).

2. По спектру передаваемых частот кабели делят на низкочастотные (до 10 кГц) и высокочастотные (свыше 10 кГц).

3. В зависимости от условий прокладки и эксплуатации кабели подразделяют на воздушные (подвесные), подземные (для прокладки в грунте), подводные и кабели для прокладки в канализации.

4. По конструкции и взаимному расположению проводников цепи электрические кабели бывают симметричные и коаксиальные. Симметричная цепь (пара) состоит из двух изолированных проводников с одинаковыми конструктивными и электрическими свойствами. У коаксиальной цепи внутренний проводник концентрически расположен внутри внешнего проводника, имеющего форму полого цилиндра (рис. 2.1, ж). Внутренний проводник изолирован от внешнего различными изоляционными прокладками (шайбами, баллонами, корделями и т.д.).

Конструктивные элементы электрических кабелей. В конструктивном отношении кабель состоит из сердечника и защитных покровов. Сердечник - это скрученные в определенном порядке изолированные проводники, образующие электрические цепи. Защитные покровы - это влагонепроницаемая оболочка (металл, пластмасса и металлопластмасса) и наружные покровы (джут, броня, шланг).

Сердечник содержит следующие конструктивные элементы:

1. Токопроводящие жилы - изготавливают из меди, алюминия или алюминия и меди (биметалла). Медь, как правило, используют отожженную, мягкую марки ММ с удельным сопротивлением $\rho=0,01754 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ и температурным коэффициентом сопротивления постоянному току $\alpha_{T0}=0,004 \text{ (1/град)}$.

Для ВЧ кабелей связи чаще всего применяют медные жилы диаметрами 0,9 и 1,2 мм, а также алюмомедные жилы (на алюминиевую жилу наносят тонкий слой меди). В подводник и радиочастотных кабелях используют многопроволочную жилу, состоящую из скрученных проволок разного сечения.

Для городских кабелей применяют медные жилы диаметром 0,32; 0,4; 0,5 и 0,7 мм. В коаксиальных кабелях в качестве внешнего проводника служат цилиндрические медные трубки с продольным швом, гофрированные или оплеточные, а также алюминиевые трубки.

2. Изоляция токопроводящих жил. Для изоляции жил кабелей связи наряду с бумагой используют полимеризационные пластмассы - полистирол (стирофлекс), полиэтилен, фторопласт. При конструировании кабельной изоляции стремятся сделать так, чтобы количество твердого диэлектрика было минимальным, обеспечивающим устойчивость изоляции и жесткость конструкции кабеля, а количество воздуха, как наилучшего диэлектрика.

Известны следующие конструкции сплошной и воздушной комбинированной изоляции в кабелях связи:

трубчатая - выполняется в виде бумажной или пластмассовой ленты, наложенной в виде трубки (рис. 2.1, а);

кордельная - состоит из корделя, накладываемого на проводник по спирали, из тонкой ленты, наложенной поверх корделя (рис. 2.1, б);

сплошная - выполняется из сплошного слоя пластмассы (рис. 2.1, в);

пористая - образуется из слоя пенопласта (рис. 2.1, г);

баллонная - представляет собой тонкостенную пластмассовую трубку, внутри которой свободно располагается проводник. Трубка периодически в точках или по спирали обжимается горячим инструментом и надёжно удерживает после затвердевания жилу в центре изоляции (рис. 2.1, д, е);

шайбовая - выполняется в виде шайб из твердого диэлектрика, насаживаемых на проводник через определенное расстояние (рис. 2.1, ж).

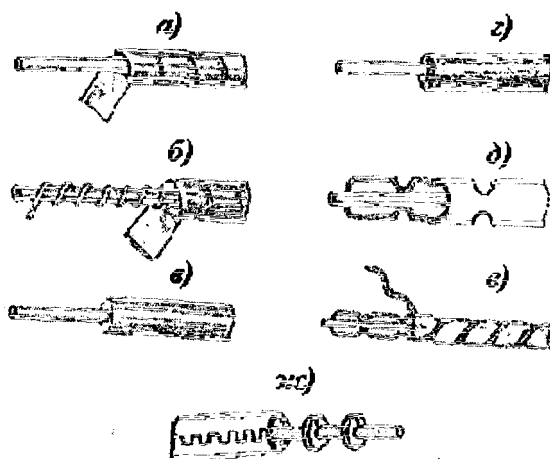


Рис. 2.1. Основные типы изоляции токопроводящих жил

Наибольшее применение находят следующие виды изоляции:

- для кабелей ГТС и СТС трубчатая бумажная, сплошная полиэтиленовая, пористая бумажная и полиэтиленовая;

- для симметричных ВЧ кабелей кордельно-бумажная, кордельно-полистирольная, сплошная и пористо-полиэтиленовая.

Изолированные жилы, скрученные определенным образом, образуют элементарные группы. Жилы скручивают для защиты от взаимных электромагнитных влияний.

В симметричных кабелях применяют следующие наиболее распространенные способы скрутки изолированных проводников в группы (рис. 2.2):

- парная скрутка (П) - два изолированных проводника скручиваются с шагом до 300 мм, обозначается 1x2 (одна пара);

- звездная скрутка (З) - четыре изолированные жилы, расположенные по углам квадрата, скручивают с шагом 150...300 мм, обозначается 1x4 (одна четверка);

- двойная парная скрутка (ДП) - две предварительно скрученные пары скручивают между собой в четверку с шагом 150...300 мм;

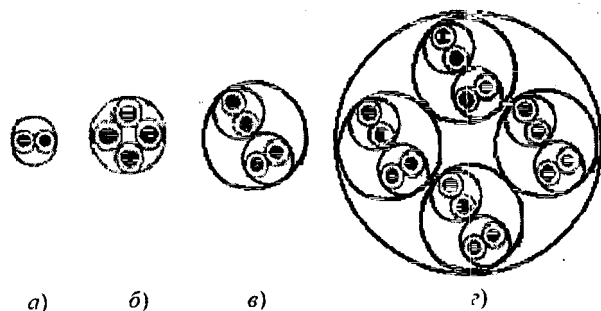


Рис. 2.2. Типы скрутки жил в группы:

а – парная скрутка;

б – звездная скрутка;

в – двойная парная скрутка;

г – двойная звездная скрутка

Скрученные в группы изолированные жилы систематизируют по определенному закону и объединяют в общий кабельный сердечник. Различают сердечники с однородной (одинаковая структура элементарных групп - четверки, пары) и неоднородной (разнородные по структуре и диаметру элементарные группы) скрутками. В зависимости от характера образования сердечника различают повивную и пучковую скрутки (рис. 2.3).

В повивной скрутке элементарные группы располагают последовательными концентрическими слоями (повивами) вокруг центрального повива, состоящего из 1...5 групп (рис. 2.3, а, б). Смежные повивы скручивают в противоположные стороны для уменьшения взаимного влияния и придания кабельному сердечнику большей механической прочности.

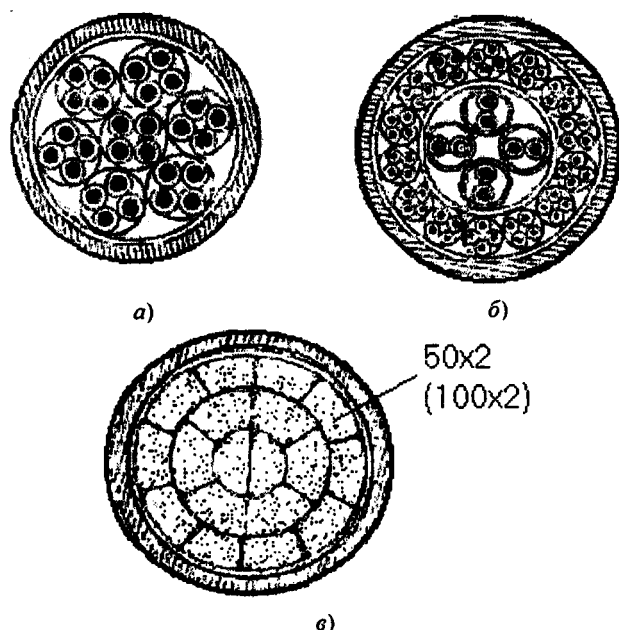


Рис. 2.3. Виды скрутки кабельного сердечника:
а – повивная однородная система скрутки групп кабельных жил в сердечнике;
б – повивная неоднородная система скрутки групп кабельных жил в сердечнике;
в – пучковая система скрутки групп кабельных жил в сердечнике

При пучковой скрутке группы сначала объединяют в пучки (50 или 100 групп), а затем, пучки скручивают вместе, образуя сердечник кабеля (рис. 2.3, в). Пучковую скрутку применяют лишь для НЧ кабелей ГТС. Также применяется разнонаправленный способ скрутки кабелей ГТС, заключающийся в том, что отдельные отрезки кабеля имеют попеременно то правую, то левую скрутку (SZ-скрутка).

Защитные покровы. Сердечник кабеля покрывают поясной изоляцией из полиэтиленовой или бумажной ленты и заключают в герметичную оболочку для защиты жил от влаги, света и других атмосферных факторов, а также механических и электромагнитных воздействий. Оболочки бывают металлические (свинцовые, алюминиевые, стальные, гофрированные), пластмассовые (полиэтиленовые) и металлопластмассовые.

К металлическим оболочкам относятся главным образом свинцовые, алюминиевые и стальные. Свинцовые оболочки накладываются на сердечник методом опрессовывания в горячем виде. Чтобы свинцовая оболочка имела большую твердость и вибростойкость, ее изготавливают из легированного свинца с присадкой 0,4...0,8% сурьмы. Алюминиевые оболочки выпрессовывают в горячем виде или изготавливают из ленты со сварным продольным швом при помощи аргоно-дуговой сварки или сварки токами высокой частоты. Алюминиевые оболочки более предпочтительны, так как они легкие, дешевые и обладают высокими экранирующими свойствами. Однако они сильно подвержены электрохимической коррозии, поэтому их надежно защищают полиэтиленовым шлангом с предварительно наложенным слоем битума. Стальные оболочки изготавливают путем сварки. Для повышения гибкости их гофрируют, а с целью защиты от коррозии покрывают полиэтиленовым шлангом.

Из пластмассовых оболочек наибольшее применение получили полиэтиленовые и поливинилхлоридные. Пластмассовые оболочки сочетают влагостойкость, стойкость против коррозии, придают кабелю гибкость, легкость и вибростойкость. Однако через пластмассу постепенно диффундируют водяные пары, что приводит к снижению сопротивления изоляции кабеля. Поэтому полиэтиленовые оболочки используются в кабелях с полиэтиленовой изоляцией жил. Поливинилхлоридные оболочки по причине низкой влагостойкости применяются

в основном в стационарных кабелях. Достоинством поливинилхлоридных оболочек является большая огнестойкость.

Из металлопластмассовых оболочек в кабельной технике находит применение алюмополиэтиленовая оболочка, представляющая собой полиэтиленовую трубку, металлизированную внутри слоем алюминиевой фольги.

Металлические оболочки не только защищают сердечник кабеля от механических воздействий, но и выполняют функцию экрана, т.е. защищают электрические цепи от электромагнитных воздействий. При прокладке кабелей непосредственно в земле или в воде они обязательно снабжаются дополнительной защитой. Защита включает подушку, броневой покров и наружный покров. Подушка бронированных кабелей обычно состоит из последовательно наложенных слоев битумного состава и пропитанной кабельной пряжи (джута). Броневой покров (броня) выполняется из стальных лент, плоской или круглой стальной проволоки. Поверх брони на кабель накладывается наружный покров, состоящий из пропитанной битумом кабельной пряжи. В кабелях с алюминиевыми и стальными оболочками и бронепокровами, которые сильно подвержены коррозии, применяются усиленные защитные покровы из вязкого подклеиваемого битумного слоя и стирофлексного шланга.

2. 2. Маркировка электрических кабелей связи.

Для удобства классификации и пользования электрическим кабелям связи присваивается буквенно-цифровое обозначение - марка кабеля, которая позволяет определить его конструкцию и назначение.

Под маркой кабеля понимается система условных обозначений, отражающих при помощи букв и цифр основные классификации.

Первые одна или две буквы определяют назначение кабеля.

1. Магистральные симметричные кабели обозначают буквами МК, магистральные коаксиальные-буквами КМ.

2. Зоновый кабель (симметричный) - ЗК; внутризоновый коаксиальный - ВК.

3. Местные кабели: КС - кабель сельский; Т - телефонный низкочастотный. Марки низкочастотных кабелей отличает стоящая на втором месте буква: «С» - стационарный (ТС); распределительный (ТР); дальней связи «З» (обозначает звездную четверочную скрутку, например, ТЗБ).

Малогабаритные коаксиальные кабели имеют маркировку МКТ (с трубчато-полиэтиленовой изоляцией). Основу марок радиочастотных кабелей составляет буква "Р".

Последующие одна или две буквы обозначают особенность конструкции или материал изоляции кабеля. Например, звездная скрутка НЧ кабеля обозначается буквой З, полиэтиленовая изоляция - П, кордельно-лолестирольная (стирофлексная) изоляция - С, трубчато-полиэтиленовая - Т. Бумажная изоляция в симметричных и шайбаваая изоляция в коаксиальных кабелях не имеет буквенных обозначений (маркируются отсутствием буквы).

Последние одна или две буквы марки кабеля обозначают материал и род защитного покрова.

Оболочка: голый оцинкованный кабель обозначается буквой Г, стальная оболочка - буквой С или Ст, алюминиевая оболочка - буквой А. Свинцовая оболочка маркируется отсутствием буквы.

Броня: буква Б - бронирование кабеля двумя стальными лентами с наружным джутовым защитным покровом; К - бронирование, круглыми оцинкованными проволоками с наружным покровом; БГ - бронированный голый, т.е. без наружного защитного покрова.

При наличии противокоррозионных изолирующих покровов в подброневой подушке к обозначению прибавляются строчные буквы: л - слой поливинилхлоридных лент, полиэтиленовый шланг; в - поливинилхлоридный шланг. При наличии таких наружных покровов буквы Шп обозначают полиэтиленовый шланг.

В конце марки кабеля указывают число жил или коаксиальных пар и диаметр жил (проводников). Например, четырехчетверочный кабель с жилами диаметром 1,2 мм имеет следующее обозначение: 4x4-1,2; пятисотпарный городской кабель с жилами диаметром 0,32 мм имеет цифровое обозначение: 500x2-0,32; одна четверочный коаксиальный кабель обозначается: 4-2,6/9,4.

2.3. Классификация и конструкция волоконно-оптических кабелей.

Оптическим кабелем (ОК) называется кабельное соединение, содержащее одно или несколько оптических волокон, объединенных в единую конструкцию, обеспечивающую их работоспособность в заданных условиях эксплуатации (5). Оптические волокна, модули или жгуты заключают в общую оболочку, поверх которой в зависимости от условий эксплуатации может быть наложен защитный покров.

По назначению оптические кабели делятся на магистральные, зоновые, городские, станционные (внутриобъектовые и монтажные).

Магистральные ОК предназначены для передачи информации на большие расстояния, и поэтому они должны обладать малым затуханием, дисперсией и большой широкополосностью.

Зоновые кабели предназначены для связи областного центра с районами и городами области. Дальность связи, как правило, составляет порядка сотни километров.

Городские оптические кабели используются в качестве соединительных линий между районными АТС и узлами связи. Они рассчитаны на короткие расстояния (5...10 км) и большое число каналов. Эти линии, как правило, работают без промежуточных линейных регенераторов.

Сельские ОК предназначены для организации сельской телефонной связи, имеют преимущественно четырехволоконную конструкцию и прокладываются в грунт или подвешиваются по опорам.

Объектовые кабели служат для передачи различного рода информации внутри объекта. Сюда относятся кабели для информационных систем отдельных объектов (самолет, корабль и др.), а также для организации различных видов учрежденческой связи.

Монтажные ОК предназначены для внутреннего и межблочного монтажа аппаратуры.

По условию прокладки кабели делятся на воздушные, подземные, подводные.

Кабели воздушной подвески (рис. 2.4) подвешиваются на опорах различного типа и делятся:

- на самонесущие - с несущим тросом или без него, подвешиваемые на опорах ЛЭП и контактной сети железных дорог;
- прикрепляемые - крепятся к несущему проводу с помощью диэлектрических шнуров или ленты, или же с помощью специальных зажимов, или спиралевидных отрезков металлической проволоки;
- навиваемые - навиваются вокруг существующего, например, фазового провода или провода заземления (грозотроса), встраиваемые в грозотрос.

Кабели подземной прокладки делятся:

- на кабели, прокладываемые в кабельной канализации и туннелях;
- кабели, закапываемые в грунт;

- кабели автоматической прокладки в специальных полиэтиленовых трубах.

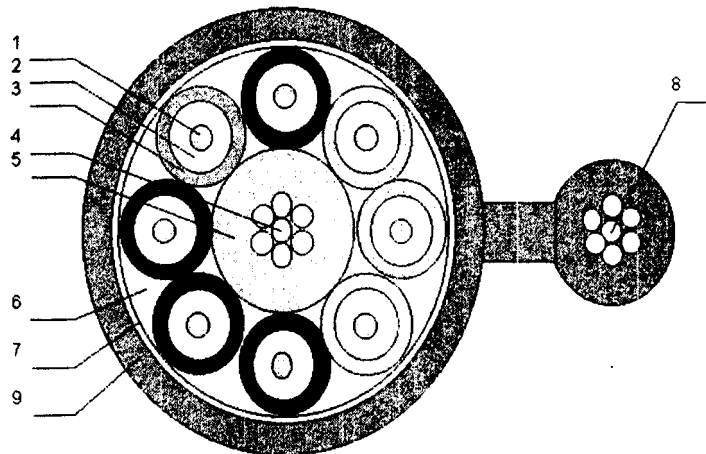


Рис. 2.4. Подвесной оптический кабель:

- 1 – оптическое волокно;
- 2 – гидрофобный наполнитель;
- 3 – полимерная трубка;
- 4 – центральный силовой элемент;
- 5 – полимерная трубка;
- 6 – гидрофобный наполнитель;
- 7 – скрепляющая лента;
- 8 – синтетическая нить

Подводные кабели делятся:

- на кабели, укладываемые на дно несудоходных рек, неглубоких озер и болот (используются при прохождении водных преград небольшой длины);
- кабели, укладываемые на дно морей и океанов (что может означать не только укладку на дно, но и закрепление на определенной глубине или закапывание в донный грунт на определенную глубину).

Основным элементом ОК является оптический волновод - круглый стержень из оптически прозрачного диэлектрика (направляющая среда, структура которой обеспечивает распространение оптического излучения вдоль нее [5]). Оптические волноводы из-за малых размеров поперечного сечения обычно называют волоконными световодами или оптическими волокнами (ОВ).

Для изготовления ОВ используют однородные стёкла высокой частоты и качества. При этом в зависимости от назначения кабеля в конструкцию закладываются одномодовые (магистральные), многомодовые градиентные (зоновые и городские) или многомодовые ступеньчатые волокна (городские и объектовые кабели).

Стеклоплетенное двухслойное волокно для защиты от механических и атмосферных воздействий и усиления конструкции снаружи имеет полимерное покрытие.

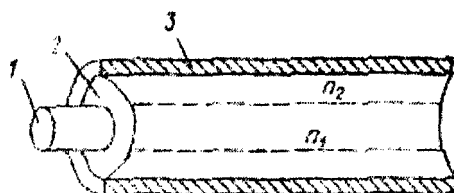


Рис. 2.5. Структура оптического волокна:

- 1 – сердцевина;
- 2 – оболочка;
- 3 – защитное покрытие

В некоторых конструкциях волокно свободно расположено в трубке из фторопласта - оптического модуля (рис. 2.6). Пространство между волокном и модулем иногда заполняется синтетическими нитями.

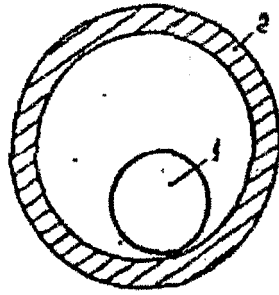


Рис. 2.6. Модуль оптический:
1 – оптоволокно;
2 – трубка.

Кроме оптических волокон (модулей) ОК может состоять из следующих элементов:

- силовых (упрочняющих) стержней, принимающих на себя продольное усиление;
- заполнителей в виде сплошных пластмассовых нитей;
- армирующих элементов, повышающих стойкость кабеля к механическим воздействиям;
- наружных защитных оболочек, предохраняющих от проникновения влаги и внешних механических воздействий.

ОВ имеют высокий модуль упругости по сравнению с большинством материалов, используемых в конструкциях ОК. Поэтому, когда продольная сила деформирует кабель, самое большое напряжение развивается в ОВ, что в конечном итоге может привести к его обрыву. Чтобы избежать появления слишком больших напряжений в ОВ и обеспечить высокую механическую прочность ОК, в его конструкцию вводят дополнительные силовые (упрочняющие) элементы. Материал для силовых элементов должен обладать высоким модулем упругости и пределом прочности на разрыв, а также иметь малый удельный вес. Применяются синтетические (высокопрочные материалы) и металлические (сталь, медь, алюминий), силовые элементы.

Различают два варианта взаимного расположения силовых элементов и ОВ. В первом случае силовой элемент располагают в центре кабеля, а ОВ - концентрично относительно центрального элемента. Во втором случае силовые элементы размещают на периферии с внешней стороны пучка ОВ.

При центральном расположении силового элемента обеспечивается максимальная гибкость. При периферийном расположении силовых элементов гибкость кабеля меньше, однако, конструкция эффективнее противостоит радиальным усилиям и ударам.

Наружная оболочка ОКС содержит демпфирующую и защитную оболочки. Демпфирующую оболочку изготавливают из пористой пластмассы, а в качестве наружной оболочки наибольшее распространение получили пластмассовые оболочки из полиэтилена. Такие оболочки используют для монтажных, объектовых кабелей, а также кабелей ГТС, прокладываемых в телефонной канализации. В ОК для подземной прокладки могут использоваться алюминиевые оболочки с защитным полиэтиленовым шлангом от коррозии. Различают также ОК с броней из стальных проволок, стальной ленты, стальной оплетки, стеклоплетки, с жилами для дистанционного питания (ДП) и без них. Подводные кабели имеют полиэтиленовую оболочку и стальную круглопроволочную броню.

В зависимости от конструкции сердечника наибольшее распространение получили 3 группы конструкций ОК: кабели повинной скрутки (модульная конструкция), с фигурным (профилированным) сердечником, ленточного типа (плоская конструкция) (рис. 2.7 - 2.9).

Кабели первого типа имеют повинную скрутку сердечника по аналогии с электрическими кабелями (рис. 2.7).

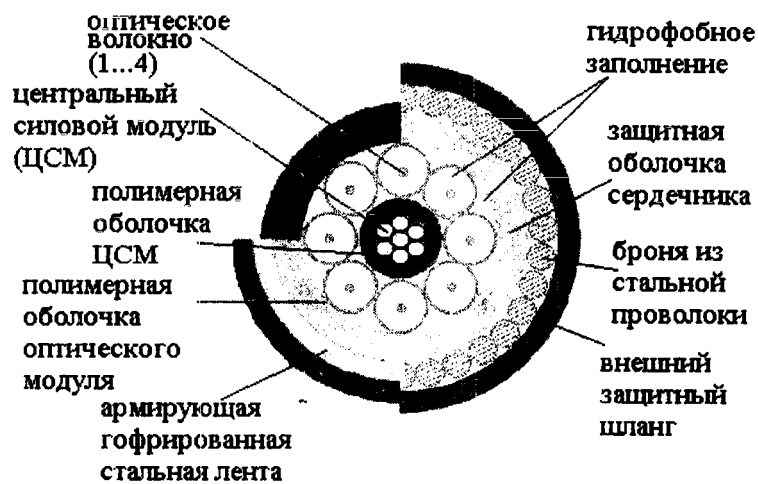


Рис. 2.7. Модульная конструкция оптического кабеля

ОК второй группы (рис. 2.8) имеют в центре армированный силовыми элементами фигурный пластмассовый сердечник с пазами, в которых размещены оптические волокна. Пазы и соответственно волокна расположены по геликоиде, и поэтому волокна не испытывают продольного усиления на разрыв. Такие кабели содержат обычно 4, 6, 8, 10 волокон. Если необходим кабель большей емкости, то в сердечник закладывают несколько таких модулей.

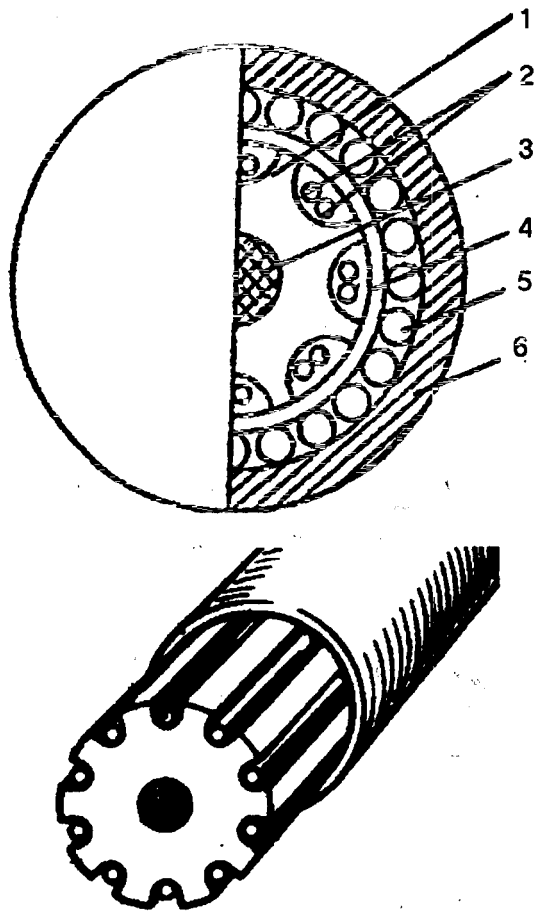


Рис. 2.8. Магистральный оптический кабель (конструкция с профилированным сердечником):

- 1 – профилированный сердечник;
- 2 – оптическое волокно;
- 3 – центральный силовой элемент из стеклопластикового стержня;
- 4 – внутренняя пластмассовая обмотка;
- 5 – стеклопластиковые стержни;
- 6 – наружная полиэтиленовая оболочка

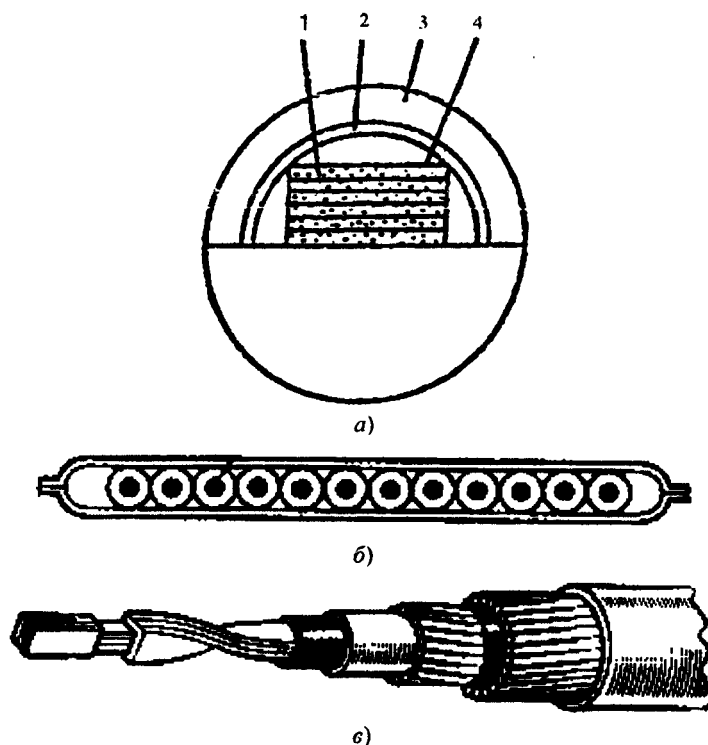


Рис. 2.9. Кабель ленточного типа:
 а – структура кабеля:
 1 – ОВ;
 2 – демпфирующая оболочка
 3 – внешняя защитная оболочка;
 4 – лента
 б – лента с волокнами:
 в – вид кабеля сбоку

Кабель ленточного типа (рис. 2.9) состоит из набора плоских пластмассовых лент, в которые вмонтировано определенное число (чаще всего 12) оптических волокон. В стопке расположено 6, 8 или 12 лент.

2.4. Маркировка оптических кабелей.

Оптические кабели связи (ОКС) выпускаются многими компаниями, как зарубежными (Alcatel, AMP, BICC Cables Company/BICC KWO Kabel GmbH, Focas, Fujikura, Hellukabel, Lucent Technologies, Mohawk/CDT, NC Cables, Philips, Pirelli, Samsung, Siemens, Sumitomo), так и отечественными («Москабельмет», Москва (теперь «Москабель-Фуджикура»); «Оптен», Санкт-Петербург; «Оптика-кабель», Москва (теперь «МоскабельФуджикура»); «Самарская оптическая кабельная компания (СОКК)», Самара; «Завод «Саранскабель»», Саранск; «Севкабель-оптик», Санкт-Петербург, «Трансвок», Боровск, Калининградской обл.; «Электропровод», Москва, и другие). Российские компании, как правило, используют импортное оборудование и волокно (например, волокна фирмы Corning, Alcatel, Fujikura), их продукция соответствует мировому уровню качества и подтверждена соответствующими сертификатами, что позволяет использовать ее с выгодой для отечественного потребителя.

Как показывает практика, разные фирмы-производители используют различные обозначения для оптических кабелей, поэтому маркировка иногда различается.

Маркировка ОКС может быть записана условно в следующем виде:

NNNPВ-Н-n1-n2-n3/n4-n5/n6-A,

где n1 - диаметр сердцевины ОВ обычно равный 10 мкм для одномодовых волокон или 50 (62,5) мкм для многомодовых ОВ (показатель в марке кабеля может быть опущен);

n2 - номер разработки конструкции данного типа ОК;
n3 - максимальное затухание ОВ, дБ/км;
n4 - максимальная дисперсия ОВ, пс/(нм*км) (показатель в марке кабеля может быть опущен);

n5 - число ОВ;

n6 - число медных жил для дистанционного питания (ДП)
(показатель в марке кабеля может быть опущен);

NNN-наименование кабеля, определяемое его назначением и рабочей длиной волны ОВ.

P - обозначение типа металлической оболочки (при отсутствии металлической оболочки опускается);

B - обозначение типа бронепокрова (может быть опущено);

H - параметр, указываемый в маркировке кабелей с не распространяющей горение оболочкой;

A - параметр, указываемый в маркировке кабелей, для оптических волокон которых характерна избирательность коэффициента широкополосности (например, от 500 до 800 МГц*км).

Различают следующие группы оптических кабелей: магистральный (Л), зонный (З), городской (К), полевой (П), подводный грузонесущий (Г), подводный негрузонесущий (Н), для стационарных объектов и сооружений (С), для подвижных объектов (бортовой) (Б), специальный для дистанционного управления (Д), монтажный (М), шнур (Ш). Группы подразделяются на подгруппы: для стационарной прокладки (С), для нестационарной прокладки (Н).

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются оптические кабели следующих наименований:

ОН - стационарный кабель на длину волны 0,85 мкм;

ОКС - оптический кабель стационарный на длину волны 0,85 мкм;

ОК - линейный оптический кабель для ГТС на длину волны 0,85 мкм;

ОКК - то же, на длину волны 1,3 мкм;

ОЗКГ - линейный оптический зонный кабель с броней из круглых проволок для прокладки в грунт с ОВ на длину волны 1,3 мкм;

ОКЗ - линейный оптический кабель для зонных линий связи с ОВ на длину волны 1,3 мкм;

ОМЗКГ - оптический одномодовый кабель для магистральных и зонных линий связи для прокладки в грунт с ОВ на длину волны 1,3 мкм;

ОМЗВ - то же, для прокладки под водой с ОВ на длину волны 1,3 мкм;

ОКЛ - линейный оптический одномодовый кабель для магистральных и зонных линий связи с ОВ на длину волны 1,55 мкм; ОКГ - специальный оптический одномодовый кабель линейный для магистральных и зонных линий связи с ОВ на длину волны 1,55 мкм для прокладки в грунт;

ОКВ - то же, но для прокладки под водой на глубину до 500 м. В конструкциях ОКС используются медные и алюминиевые металлические оболочки, которые маркируются соответственно буквами М и А. Бронепокровы ОК маркируются, следующим образом: из круглых проволок - К; из стальных лент - Б; из стальных проволок (оплетка) - О; из стеклоплетки - С. Если кабель имеет оболочку, не распространяющую горение, то в конце наименования после обозначения типа бронепокровов указывается буква Н. Например, ОКК-Н-50-01-0,7-8; ОКЗК-Н-0,7-4/4.

Для ГТС были разработаны следующие типы оптических кабелей: ОК-50-2-5-4, ОК50-2-3-4, ОК-50-2-5-8, ОК-50-2-3-8. Они предназначены для прокладки в телефонной канализации, трубах, блоках и коллекторах ручным или механизированным способами.

Стационарные кабели, предназначенные для работы в помещениях телефонных станций, имеют следующую маркировку: ОН50-1-5-1, ОН-50-1-3-1, ОН-50-1-5-2, ОН-50-1-3-2. Во всех кабелях ГТС в основу конструкции заложен оптический модуль.

Для зонных сетей: ОЗКГ-1-0,7-4/4; ОЗКГ-2-0,7-4/0. Все они имеют гидрофобное заполнение сердечника, градиентные оптические волокна с диаметрами сердцевины 50 мкм,

оболочки 125 мкм и километрическим ослаблением 0,7... 1,5 дБ/км. Числитель в дроби марки кабеля означает число оптических волокон, а знаменатель - число медных жил для дистанционного питания.

Раздел 3 ЭЛЕКТРОДИНАМИКА НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.

3.1. Уравнения Максвелла

Основные уравнения электромагнитного поля, называемые уравнениями Максвелла, обобщают два основных закона электротехники: закон полного тока и закон электромагнитной индукции.

Согласно закону полного тока линейный интеграл напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равен полному току, протекающему через поверхность, ограниченную этим контуром. Полный ток складывается из токов смещения и токов проводимости:

$$\oint H dl = I_{см} + I_{пр} \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1) называется первым уравнением Максвелла.

В соответствии с законом электромагнитной индукции, открытым Фарадеем, электродвижущая сила, возникающая в контуре при изменении магнитного потока Φ , пронизывающего поверхность, ограниченную контуром, равна скорости изменения этого потока со знаком минус:

$$\oint E dl = -(d\Phi / dt) \quad (3.2)$$

Это уравнение называют вторым уравнением Максвелла. Уравнения (3.1) и (3.2) представлены в интегральной форме. Для решения практических задач чаще используются уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\text{rot } H = \sigma E + \epsilon_a (\partial E / \partial t) = \sigma E + j\omega \epsilon_a E, \quad (3.3)$$

$$\text{rot } E = -\mu_a (\partial H / \partial t) = -j \omega \mu_a H. \quad (3.4)$$

Здесь σ , ϵ_a, μ_a - соответственно проводимость, абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; σ_e - плотность тока проводимости (т.е. тока в металлических массах), $j\omega \epsilon_a E$ - плотность тока смещения (т.е. тока в диэлектрике).

С физической точки зрения уравнение (3.3) показывает, что изменяющееся электрическое поле создает вокруг себя магнитное поле (вихрь H), а уравнение (3.4) - что всякое изменение магнитного поля сопровождается появлением электрического поля (вихрь E). В целом изменение одного поля приводит к появлению другого поля, в результате действует и распространяется комплексное электромагнитное поле, переносящее электромагнитную энергию в пространстве и направляющих системах.

Среды могут существенно отличаться друг от друга по величине удельной проводимости σ . Чем больше удельная проводимость, тем больше плотность тока проводимости. Часто для упрощения анализа используются понятия идеального проводника и идеального диэлектрика. Идеальный проводник - это среда с бесконечно большой удельной проводимостью, а идеальный

диэлектрик - среда, не обладающая проводимостью. В идеальном проводнике может существовать только ток проводимости $j_{пр} = \sigma E$, а в идеальном диэлектрике - только токи смещения $j_{см} = j\omega\epsilon_a E$

При рассмотрении процессов в проводниках током смещения можно пренебречь, и расчетные формулы приобретут вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } H &= \sigma E \\ \text{rot } E &= -j\omega\mu_a H \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Здесь для циркуляции тока проводимости должны иметься прямой и обратный провода, т.е. направляющая: система должна быть двухпроводной (симметричные, коаксиальные цепи, полосковые линии).

В диэлектрических направляющих системах (диэлектрические волноводы, световоды), а также в атмосфере преобладают токи смещения, и для их анализа пользуются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } H &= j\omega\epsilon_a E \\ \text{rot } E &= -j\omega\mu_a H \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Так как направляющие системы имеют цилиндрическую конструкцию, то наиболее часто записывают уравнения Максвелла в цилиндрической системе координат (оси z, r, φ), при этом ось z совмещают с осью направляющей системы (рис. 3.1).

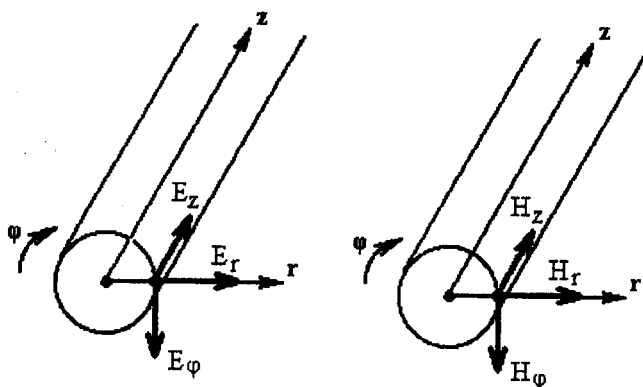


Рис. 3.1. Компоненты электромагнитного поля в цилиндрической системе координат

Рис. 3.1. Компоненты электромагнитного поля в цилиндрической системе координат

Из курса «Электродинамика» известно, что в цилиндрической системе координат уравнения Максвелла для проводников имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} 1/r (\partial E_z / \partial \varphi) &= -j \omega \mu_a H_r, \\ \partial E_z / \partial r &= j \omega \mu_a H_\varphi, \\ (\partial H_\varphi / \partial r) + (H_\varphi / r) - 1/r (\partial H_r / \partial \varphi) &= \sigma E_z \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

После дифференцирования H_r по φ и H_φ по r и подстановки полученных производных в указанные уравнения получим:

$$\partial^2 E_z / \partial r^2 + 1/r (\partial E_z / \partial r) + 1/r^2 (\partial H_r / \partial \varphi) = jk^2 E_z, \quad (3.8)$$

где $k = \sqrt{\omega\mu_a\sigma}$ - коэффициент вихревых токов (по модулю).

Решая данное уравнение, находим E_z , величина H_z определяется из уравнения

$$H_\phi = [1/(j\omega\mu_a)] \cdot [\partial E_z / \partial r]. \quad (3.9)$$

Зная компоненты электромагнитного поля E и H , можно определить энергию, распространяющуюся вдаль проводника, а также энергию, поглощаемую или излучаемую им.

3.2. Теорема Умова-Пойнтинга.

Теорема Умова-Пойнтинга характеризует баланс энергии электромагнитного поля. Запас электромагнитной энергии в объеме V составляет

$$W = \int_V \left(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV, \quad (3.10)$$

где $\frac{\epsilon_a E^2}{2}$ – энергия электрического поля в единице объема;

$\frac{\mu_a H^2}{2}$ – энергия магнитного поля в единице объема.

Используя уравнение Максвелла, получаем

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV = \iint_S [E \times H] dS + \int_V \sigma E^2 dV, \quad (3.11)$$

где dS – элемент поверхности S , ограничивающий объем V .

Данное выражение носит название теоремы Умова-Пойнтинга. Левая часть выражения характеризует расход электромагнитной энергии за единицу времени, правая часть показывает, на что расходуется за единицу времени заключенная в объеме энергия.

Первый член правой части выражения (3.11) представляет собой поток энергии за единицу времени через замкнутую поверхность объема V в окружающее пространство или в объем V от внешних источников.

Количество энергии, распространяющейся в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока энергии, выражается векторной величиной

$$P = [E \times H],$$

называемой вектором Умова-Пойнтинга (вектором Пойнтинга).

Второй член в соответствии с законом Джоуля-Ленца характеризует энергию внутри объема V , преобразованную в тепло за единицу времени.

Направление движения электромагнитной энергии в пространстве показывает направление вектора Пойнтинга. Теорема Пойнтинга позволяет установить связь между напряженностями полей E и H на поверхности какого-либо объема с потоком энергии, входящей в этот объем либо выходящей из него.

Например, зная компоненты электромагнитного поля E_z и H_ϕ можно определять энергию, распространяющуюся вдоль проводника P_z . Энергия, излучаемая в пространство, характеризуется радиальной составляющей вектора Пойнтинга P_r .

Таким образом, уравнения Максвелла дают принципиальную возможность точно решить практически любую электродинамическую задачу, включая передачу сигналов связи по различным направляющим системам в разных диапазонах частот, однако во многих случаях сложно, а порой и нецелесообразно искать точные решения на базе электродинамики. Например, в диапазоне относительно низких частот (до 10^8 Гц), когда длина волны передаваемых колебаний значительно превышает поперечные размеры направляющей системы D ($\lambda \gg D$), имеем дело с медленно меняющимися полями, где преобладают токи проводимо-

сти (квазистационарный режим). В этом случае целесообразнее для анализа процессов в направляющих системах (воздушные линии, симметричные и коаксиальные кабели) пользоваться методами теории линейных электрических цепей, т. е. переходить от волновых процессов к колебательным.

В частотном диапазоне $10^{13} \dots 10^{15}$ Гц, когда $\lambda \ll D$ (оптические кабели), для качественной оценки работы систем переходят к лучевым процессам (методы геометрической оптики). На промежуточных частотах ($10^{10} \dots 10^{12}$ Гц), когда длина волны сравнима с поперечными размерами направляющей системы ($\lambda \approx D$), необходимо пользоваться уравнениями Максвелла (электродинамический режим). К таким направляющим системам относятся волноводы, волоконные световоды, а также радиочастотные коаксиальные кабели.

Для канализации электромагнитной энергии в заданном направлении необходимо иметь границу раздела сред (металлдиэлектрик, диэлектрик-диэлектрик с различными диэлектрическими проницаемостями). Поэтому роль направляющей системы могут выполнять изолированные металлические проводники (воздушная линия связи, симметричный и коаксиальный кабели, ленточный кабель) или диэлектрический стержень из материала с $\epsilon > 1$ (диэлектрический волновод, волоконный световод).

Все направляющие системы, исходя из физических принципов канализации электромагнитной энергии, можно разделить на две группы. К первой группе относят двухпроводные направляющие системы (коаксиальные и симметричные цепи). Характерной особенностью этих линий является наличие прямого и обратного проводов. В таких направляющих системах может распространяться так называемая поперечно-электромагнитная волна типа Т. Ее особенностью является то, что она содержит только поперечные составляющие электрического (Е) и магнитного (Н) полей, продольные составляющие Е и Н равны нулю. Силовые линии волны типа Т в точности повторяют картину силовых линий поля при статическом напряжении и постоянном токе. В направляющей системе при этом преобладающим является ток проводимости ($I_{пр}$), и для расчета параметров передачи можно пользоваться телеграфными уравнениями, связывающими токи и напряжения при распространении электромагнитной энергии вдоль цепи.

Ко второй группе направляющих систем относятся волноводы различных типов. Для них характерно распространение волн высших типов (Е, Н, ЕН, НЕ), которые обязательно содержат хотя бы по одной продольной составляющей поля; для волн класса Е составляющая $E_z \neq 0$, а для волн класса Н $H_z \neq 0$. Эти волны возбуждаются в весьма высоком частотном диапазоне. Для нахождения условий их распространения, необходимо пользоваться уравнениями Максвелла или методами геометрической оптики.

Наряду с делением на классы электромагнитные волны делят также по типам. Тип волны или мода определяется сложностью структуры, т.е. числом максимумов и минимумов поля в поперечном сечении направляющей системы.

3.3. Расчёт параметров передачи двухпроводных направляющих систем.

Физические процессы. Рассмотрим процесс распространения электромагнитной энергии вдоль однородной симметричной цепи. Пусть имеем однородную цепь без потерь, состоящую из двух одинаковых проводников а и б круглого сечения радиуса $r = r_a = r_b$. Совместим начало цилиндрической системы координат с началом провода а. При этом ось z совпадает с осью проводника, а ось r проходит через центры проводников а и б (рис. 3.2, а). В режиме согласования, при $Z_0 = Z_b = Z_1$, в цепи будут только падающие волны, т.е. волны, распространяющиеся в положительном направлении оси z. Пусть в цепи распространяется волна типа Т. Тогда векторы напряженности электрического и магнитного полей в любой точке пространства, окружающего проводники, находятся в плоскости, перпендикулярной к оси проводников.

Предположим, что в сечении цепи, проходящем через точку m, на проводе а будет положительный потенциал, а на проводе б - отрицательный в соответствии с направлением тока на рисунке.

Тогда вектор напряженности электрического поля E в точке m в цилиндрической системе координат будет равен E_r и направлен от провода а к проводу б.

Вектор напряженности магнитного поля H в соответствии с правилом буравчика в этой точке в цилиндрической системе координат равен $H_\phi = H_{\phi a} + H_{\phi b}$. Тогда вектор Пойнтинга по правилу буравчика будет направлен от генератора к нагрузке параллельно оси провода (ось z).

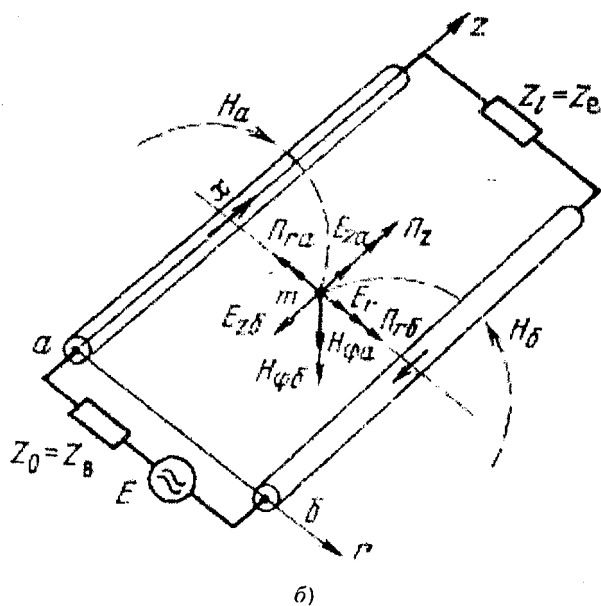
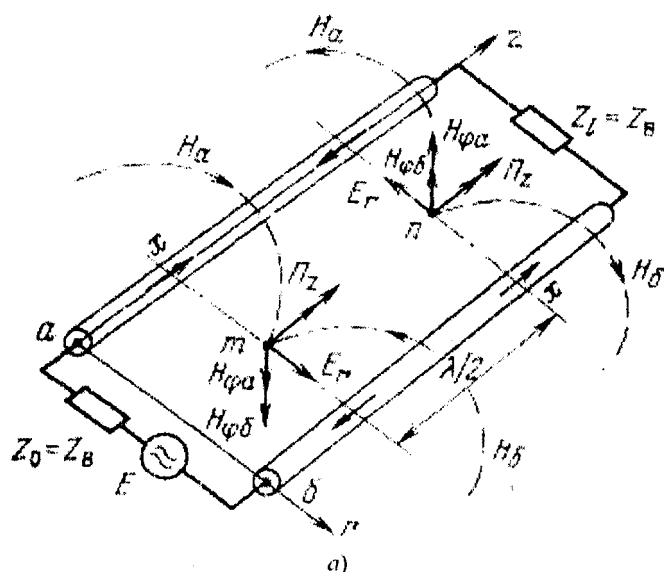


Рис. 3.2. Распространение электромагнитной энергии вдоль однородной цепи без потерь (а) и с потерями (б)

В сечении, отстоящем на расстоянии $\lambda/2$, направления векторов E и H изменяются на противоположные, а направление вектора Пойнтинга Π останется неизменным, хотя токи в проводниках имеют противоположное направление. Отсюда следует, что электромагнитная энергия передается от генератора к нагрузке не зарядами, движущимися по проводникам, т.е. электрическим током, а электромагнитным полем, которое распространяется в окружающем проводник диэлектрике. Провода здесь являются только системой, направляющей движение волн в канале между проводами, осью которой является ось цепи (ось z).

В однородной цепи с потерями, обладающей активным сопротивлением, кроме возникновения напряжения между проводами U_r , происходит еще и его падение вдоль проводов U_z . Поэтому в цепи с потерями электрическое поле характеризуется двумя составляющими – E_r и E_z (рис. 3.2, б). Вектор напряженности магнитного поля H_ϕ лежит в плоскости, перпендикулярной оси проводников, так как ток течет вдоль оси z .

Составляющие E_{za} и $E_{zб}$ вызывают появление составляющих векторов Пойнтинга Π_{ra} и Π_{rb} направленных перпендикулярно оси линии и поверхностям проводников. Таким образом, вектор

$$\Pi_z = [E_r \times H_\phi]$$

характеризует энергию, переносимую волной вдоль цепи к нагрузке за единицу времени.

Векторы $\Pi_{ra} = [E_{za} \times H_\phi]$ и $\Pi_{rb} = [E_{zб} \times H_\phi]$ характеризуют энергию, входящую в провода а и б за единицу времени.

Часть энергии, вошедшей в провода, сосредоточивается в магнитном поле внутри проводов и определяется их внутренней индуктивностью $L_{внутр.}$. Другая часть энергии, сосредоточенная в электрическом поле, идет на нагревание проводников, рассеиваясь в виде тепла в окружающем пространстве, и характеризуется активным сопротивлением проводников R .

Основная часть энергии, движущейся вдоль проводов, сосредоточена межпроводном электрическом и магнитном полях, а некоторая часть теряется в диэлектрике. Изменение межпроводного электрического и магнитного полей характеризуется межпроводной (внешней) индуктивностью $L_{внешн.}$, емкостью C и проводимостью изоляции G .

Параметры R , $L = L_{внутр.} + L_{внешн.}$, C и G носят название первичных параметров цепи. Первичные параметры равномерно распределены по всей длине цепи. При этом R и G обуславливают активные потери энергии соответственно в проводниках, других металлических частях кабеля и изоляции цепи.

Хотя процесс распространения электромагнитной энергии является единым, охватывающим проводники и изоляцию, удобно рассматривать процессы отдельно в металле проводников и диэлектрике изоляции.

Поверхностный эффект и эффект близости. Под действием переменного поля в проводниках происходит перераспределение электромагнитной энергии по сечению. При этом наблюдаются явления поверхностного эффекта, эффекта близости, воздействия на параметры цепи окружающих металлических масс (соседних проводников, экрана, брони).

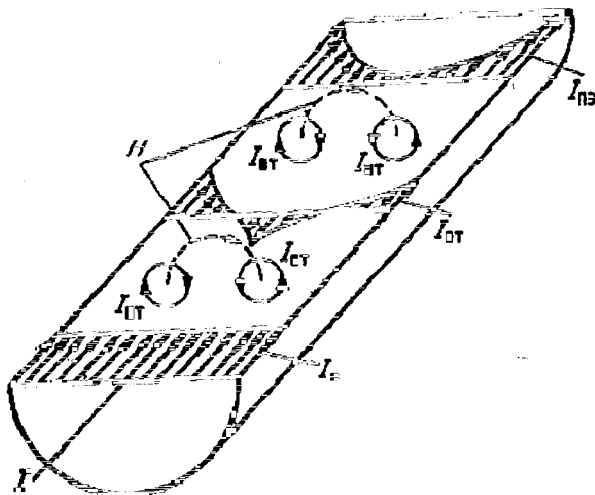


Рис. 3.3. Поверхностный эффект

Силовые линии внутреннего магнитного поля H (рис. 3.3), пересекая толщу проводника, наводят в нем вихревые токи $I_{вт}$, направленные по закону Ленца, т.е. против вращения рукоятки при поступательном движении буравчика по направлению поля. Вихревые токи в центре проводника имеют направление, обратное основному току I , протекающему по проводу, а у поверхности проводника их направления совпадают. От взаимодействия основного и вихревых токов происходит перераспределение тока по сечению проводника, в результате чего плотность тока возрастает к поверхности проводника. Это явление носит название поверхностного эффекта. Вытеснение тока на поверхность проводника сокращает эквивалентную площадь его

поперечного сечения, и, как следствие, его активное сопротивление R увеличивается, а внутренняя индуктивность уменьшается.

Эффект близости возникает между проводниками, расположенными в непосредственной близости друг от друга (рис. 3.4).

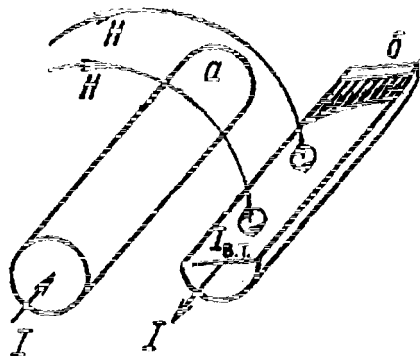


Рис. 3.4. Эффект близости

Внешнее магнитное поле H провода a , пересекая толщу провода b , наводит в нем вихревые токи. На поверхности провода b , обращенной к проводу a , вихревые токи совпадают по направлению с протекающим по нему основным током. Образуется суммарный ток $(I+I_{вт})$. На противоположной поверхности провода b они направлены навстречу основному току, образуя разностный ток $(I-I_{вт})$. Аналогичное перераспределение происходит в проводе a .

При взаимодействии вихревых токов с основным плотность результирующего тока на обращенных друг к другу поверхностях проводов a и b увеличивается, а на отдаленных - уменьшается. Это явление «сближения» токов в проводниках носит название эффекта близости. Неравномерное распределение плотности тока по проводникам также увеличивает активное сопротивление цепи и уменьшает внутреннюю индуктивность.

Окружающие металлические массы также воздействуют на параметры цепи. Вихревые токи нагревают металлические части кабеля и создают дополнительные тепловые потери энергии, кроме того, поле вихревых токов воздействует на проводники цепи и изменяет их параметры.

В коаксиальных цепях вследствие специфичности конструкции силовые линии магнитного поля располагаются в виде концентрических окружностей внутри пары. Электрическое поле также замыкается по радиальным направлениям между внутренним и внешним проводниками (рис. 3.5). Поэтому в коаксиальной цепи отсутствует внешнее поперечное электромагнитное поле, и вся энергия распространяется только внутри цепи.

Перераспределение плотности тока по сечению проводников обусловлено в основном эффектом близости, так как наблюдается очень сильное взаимодействие их полей (поле проводника a целиком охватывается проводником b). В результате ток в проводнике b перераспределяется так, что его плотность возрастает в направлении внутренней поверхности, т.е. токи в проводниках концентрируются на взаимно обращенных поверхностях проводников. Чем выше частота, тем сильнее проявляются указанные эффекты, и все поле сосредоточивается внутри коаксиального кабеля (в изоляции), а проводники лишь задают направление распространения электромагнитной энергии.

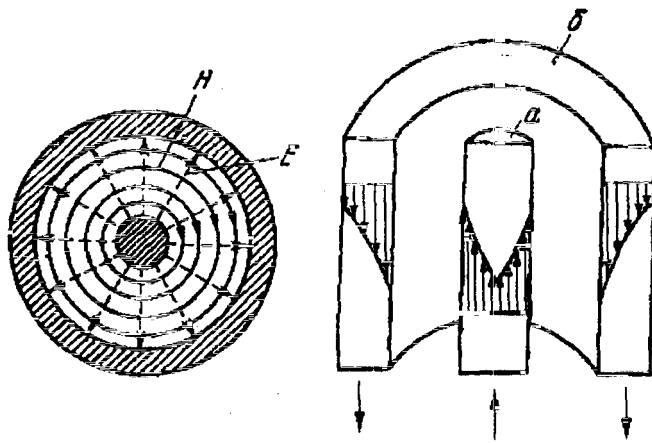


Рис. 3.5. Поле коаксиальной цепи

Расчет параметров, характеризующих процесс распространения электромагнитной энергии в проводниках. Количественно потери в проводниках можно определить нахождение составляющей вектора Пойнтинга, проникающей в толщу проводников через их поверхность:

$$\Pi_r = \int_S [E_z \times H_\varphi] dS. \quad (3.11)$$

Для единицы длины цилиндрического проводника при синусоидальном изменении поля радиальная составляющая вектора Пойнтинга составляет

$$\Pi_r = I^2 Z = \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r d\varphi. \quad (3.12)$$

Полное внутреннее сопротивление проводника Z , представляющее собой сумму активной (R) и реактивной ($j\omega L_{\text{внутр.}}$) составляющих, определяется выражением:

$$Z = R + j\omega L_{\text{внутр.}} = \frac{1}{I^2} \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r d\varphi, \quad (3.13)$$

где R - активное сопротивление проводника;

$L_{\text{внутр.}}$ - внутренняя индуктивность ($j\omega L_{\text{внутр.}}$ - реактивное сопротивление индуктивности);

E_z - продольная составляющая вектора E на поверхности проводника;

H_φ^* - комплексно-сопряженная величина тангенциальной составляющей вектора H на поверхности проводника;

r - радиус проводника.

Следовательно, величины R и L могут быть определены из уравнения (3.13), если известны E_z и H_φ . Величины E_z и H_φ находят путем решения уравнений Максвелла (3.8) и (3.9) для конкретной направляющей системы. При этом необходимо учитывать, что:

- проводники в симметричном кабеле расположены близко друг к другу, существует взаимодействие электромагнитных полей соседних проводников (есть эффект близости) и структура поля искажается;

- проводники в коаксиальных цепях расположены соосно, действие эффекта близости проявляется очень сильно, внешнее поперечное электромагнитное поле равно нулю. Фактически вся энергия сосредоточена в диэлектрике внутри коаксиальной пары.

Полное сопротивление проводника определяется путем решения уравнений Максвелла и проведения соответствующих преобразований:

$$Z = R + j\omega L_{\text{внутр}} = \frac{1}{I^2} \int_0^{2\pi} E_z H_{\phi}^* r d\phi, \quad (3.14)$$

где R и L - соответственно активное сопротивление и индуктивность проводника;

$I_0(\sqrt{jkr})$ - видоизмененная функция Бесселя нулевого порядка первого рода;

$I_1(\sqrt{jkr})$ - функция Бесселя первого порядка первого рода.

Обычно пользуются заранее рассчитанными таблицами [9], где бesselевы функции и их соотношения сведены и табулированы в виде соответствующих коэффициентов $F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$, $Q(kr)$.

В симметричном кабеле проводники расположены в непосредственной близости друг к другу, поэтому при расчете приходится считаться с эффектом близости.

Таким образом, активное сопротивление симметричных кабелей (СК) состоит из сопротивления постоянному току (R_0), сопротивления за счет поверхностного эффекта ($R_{\text{п}}$), сопротивления за счет эффекта близости ($R_{\text{б}}$) и сопротивления потерь в окружающих металлических массах ($R_{\text{м}}$) (соседние проводники, экран, оболочка, броня):

$$R = R_0 + R_{\text{п}} + R_{\text{б}} + R_{\text{м}} = 2R_0 \left[1 + F(kr) + \frac{p \cdot G(kr) \cdot \left(\frac{d_0}{a}\right)^2}{1 - H(kr) \cdot \left(\frac{d_0}{a}\right)^2} \right] + R_{\text{м}}, \quad (3.1)$$

где R_0 - сопротивление цепи постоянному току, Ом/км:

$$R_0 = \frac{4000 \rho \chi}{\pi d_0^2}; \quad (3.1)$$

$\rho = 1/\sigma$ - удельное сопротивление материала жил, Ом•мм²/м;

d_0 - диаметр жил, мм;

$R_{\text{п}}, R_{\text{б}}, R_{\text{м}}$ - дополнительное сопротивление, соответственно за счет поверхностного эффекта, эффекта близости и потерь в окружающих металлических массах;

χ - коэффициент укрутки, учитывающий увеличение длины цепи за счет скрутки, принимается равным 1,01...1,07;

p - коэффициент, учитывающий потери на вихревые токи жилах второй цепи элементарной группы, для звездной скрутки $p=5$, для парной скрутки $p=1$;

a - расстояние между центрами жил цепи, мм.

При звездной скрутке $a = \sqrt{2}d_1$, при парной скрутке $a = d_1$, где диаметр изолированной жилы, мм, для кордельной изоляции определяется по формуле

$$d_1 = d_0 + 2d_{\text{к}} + 2\Delta,$$

где d_0 - диаметр токопроводящей жилы, мм;

$d_{\text{к}}$ - диаметр корделя, мм, обычно принимаем 0,6... 0,8 диаметра жилы;

Δ - общая толщина лент, наложенных поверх корделя, мм,

$\Delta = nt_{\text{л}}$,

n - число лент;

t_l -толщина ленты;

диаметр изолированной жилы со сплошной или пористой изоляцией определяется:

$$d_1 = d_0 + 2\Delta, \quad \text{где } \Delta - \text{радиальная толщина изоляционного слоя, мм;}$$

r_0 -радиус токоподводящей жилы, мм;

k - коэффициент вихревых токов, 1/мм:

$$k = \sqrt{\omega \mu_a \sigma};$$

μ_a - абсолютная магнитная проницаемость,

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \quad \text{Гн/м;}$$

μ - относительная магнитная проницаемость;

$F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$ - коэффициенты функций Бесселя, учитывающие потери на вихревые токи вследствие поверхностного эффекта близости.

Индуктивность симметричной кабельной цепи, Гн/км, определяется как сумма внешней межпроводниковой индуктивности ($L_{\text{внеш.}}$) и внутренней индуктивности самих проводников ($L_a + L_b$):

$$L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu \cdot Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (3.18)$$

где $Q(kr)$ - коэффициент функции Бесселя, учитывающий явление поверхностного эффекта.

Коаксиальные кабели используются для высокочастотных систем передачи, поэтому их параметры рассчитывают для частот выше 60 кГц. В этом случае активное сопротивление (Ом/км) состоит из суммы сопротивлений внутреннего (R_a) и внешнего (R_b) проводников с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости:

$$R = R_a + R_b = \frac{k}{2\sqrt{2} \cdot \pi \sigma} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right), \quad (3.19)$$

где R_a , R_b - активное сопротивление соответственно внутреннего и внешнего проводников, Ом/км;

r_a , r_b - диаметры соответственно внутреннего и внешнего проводников, мм;

f - частота, Гц.

Для медных проводников формула примет вид:

$$R = 4,18 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right).$$

Для алюминиевых проводников:

$$R = 5,46 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right).$$

Индуктивность коаксиальной цепи, Гн/км, состоит из сумм внешней индуктивности между проводами $L_{\text{внеш.}}$ и внутренней индуктивности проводников $L_a + L_b$. Индуктивность медных проводников составляет

$$L = L_{\text{внеш}} + L_a + L_b = \left[2 \ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{66,6}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad (3.20)$$

Для алюминиевых проводников формула примет вид:

$$L = L_{\text{внеш}} + L_a + L_b = \left[2 \ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{86,44}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad (3.21)$$

Активное сопротивление проводников цепей увеличивается увеличением частоты вследствие возрастания действия поверхностного эффекта и эффекта близости (рис. 3.6). При этом вследствие выпеснения тока из толщи проводников на поверхность сокращается эквивалентная площадь сечения проводников.

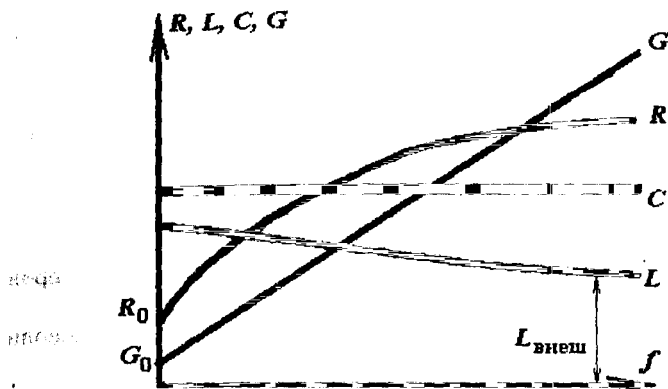


Рис. 3.6. Частотная зависимость первичных параметров
(R — активное сопротивление; L — индуктивность;
 C — емкость; G — проводимость изоляции)

Как видно из выражений (3.17), (3.19), (3.20), внешняя индуктивность цепей не зависит от частоты и определяется только их метрическими размерами.

Внутренняя индуктивность вследствие действия поверхностного эффекта и эффекта близости уменьшается (рис. 3.6). Физически это объясняется тем, что эквивалентная площадь проводника, пронизываемая магнитным потоком, сокращается.

Расчет параметров, характеризующих процессы в изоляции. В отличие от проводников, где имеются свободные электроны и действует ток проводимости, в диэлектрике нет свободных электронов, а имеются ионы и связанные диполи. Под действием переменного электромагнитного поля в диэлектрике происходят смещение диполей, их переориентации и поляризация.

Способность диэлектрика к поляризации характеризуется емкостью c , которая зависит от расстояния между проводниками цепи диэлектрической проницаемости s изоляции и не зависит от частоты (рис.3.6).

Емкость направляющих систем, Ф/км, может быть рассчитана как емкость конденсатора (плоский для воздушных линий связи и симметричных кабелей и цилиндрический для коаксиальных кабелей), образованного определенной длины отрезком воздушной линии связи:

для симметричного кабеля

$$C = \frac{\chi \epsilon_{\text{экв}} \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{a}{r} \psi \right)}, \quad (3.22)$$

где $\epsilon_{\text{экв}}$ - эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость изоляции жил;
 ψ - коэффициент, учитывающий близость соседних проводников и металлической оболочки;
 χ - коэффициент укрутки
 для коаксиального кабеля

$$C = \frac{\epsilon_{\text{экв}} \cdot 10^{-5}}{18 \ln \frac{r_b}{r_a}}. \quad (3.23)$$

Проводимость изоляции G , См/км, зависит от проводимости материала изоляции на постоянном токе G_0 , и диэлектрических потерь на поляризацию на переменном токе $G_{\text{пер}}$.

$$G = G_0 + G_{\text{пер}}. \quad (3.24)$$

Проводимость изоляции, обусловлена диэлектрическими потерями при переменном токе, определяется выражением:

$$G_{\text{пер}} = \omega C \cdot \text{tg} \delta. \quad (3.25)$$

Проводимость, обусловленная утечкой при постоянном токе из-за несовершенства диэлектрика,

составляет $G_0 = 1/R_{\text{из}}$ (3.26)

где $R_{\text{из}}$ - сопротивление изоляции цепи при постоянном токе.

При расчете проводимости изоляции кабельных линий учитывают, что величина G_0 мала по сравнению с $G_{\text{пер}}$, поэтому ею пренебрегают:

$$G = G_{\text{пер}} = \omega C \cdot \text{tg} \delta. \quad (3.27)$$

Величина $R_{\text{из}}$ нормируется: для кабелей ГТС $R_{\text{из}} \geq 5000 \text{ МОм} \cdot \text{км}$, а для высокочастотных $R_{\text{из}} \geq 10000 \text{ МОм} \cdot \text{км}$. Частотная зависимость проводимости изоляции показана на рис. 3.6.

3.4. Основные уравнения передачи по двухпроводным направляющим системам.

При изучении процессов распространения электромагнитной энергии вдоль двухпроводных электрических цепей с распределенными параметрами сами цепи характеризуются своими параметрами, а процессы в них - напряжениями и токами, которые зависят от двух переменных: времени и пространственной координаты.

Для получения исходных соотношений, определяющих процессы в цепях, используют первичные параметры цепи. Параметры R и L отображают в эквивалентной схеме продольное сопротивление цепи $Z = R + j\omega L$, а параметры C и G - поперечную суммарную проводимость цепи $Y = G + j\omega C$.

Если значения первичных параметров цепи остаются неизменными по всей длине, то такую цепь называют однородной. При этом активные потери электромагнитной энергии при ее распространении вдоль цепи обусловлены первичными параметрами R и C : первый характеризует тепловые потери в проводниках и других металлических частях направляющей системы (экран, оболочка, броня), второй - потери в изоляции.

Рассмотрим однородную цепь с первичными параметрами R, L, C, G (рис. 3.7). На входе цепи подключен генератор с внутренним сопротивлением Z_0 , а в конце цепь нагружена на сопротивление Z_1 , при этом напряжение и ток в начале цепи - U_0, I_0 , а в конце цепи - U_1, I_1 . На бесконечно малом участке dx на расстоянии x от начала цепи обозначим протекающий ток I , напряжение между проводами U . Тогда при синусоидальном токе и напряжении в комплексной форме можно записать падение напряжения и утечку тока на dx :

$$\begin{cases} -\frac{dU}{dx} = I(R + j\omega L) \\ -\frac{dI}{dx} = U(G + j\omega C). \end{cases} \quad (3.28)$$

Полученная система дифференциальных уравнений в символической форме определяет напряжение и ток в любой точке цепи как функции координаты x и справедлива по отношению к любой однородной цепи независимо от ее конструкции. Изменение конструкции приводит только к изменению численных значений первичных параметров.

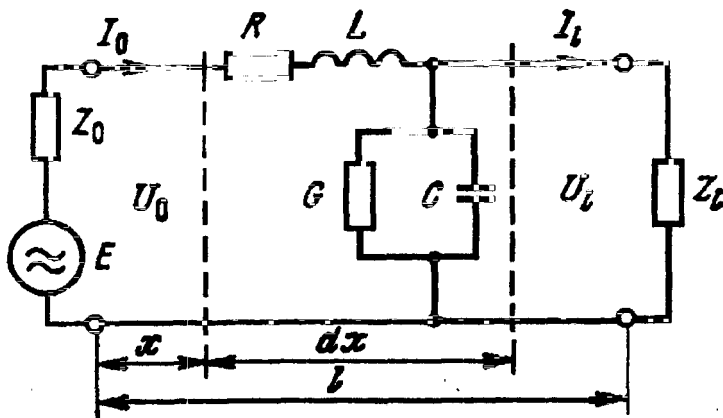


Рис. 3.7. Эквивалентная схема однородной цепи

Для решения системы относительно U и I исключим величину I из первого уравнения, а U - из второго. Для этого, дифференцируя по x и заменяя в правой части dI/dx их значением из второго уравнения, получим:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dx^2} = \gamma^2 U \\ \frac{d^2 I}{dx^2} = \gamma^2 I, \end{cases} \quad (3.29)$$

где $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$ – коэффициент распространения.

Общее решение уравнений (3.29) имеет вид:

для напряжения

$$U = A \cdot e^{-\gamma x} + B \cdot e^{+\gamma x},$$

для тока

$$I = \frac{\gamma}{R + j\omega L} (A \cdot e^{-\gamma x} - B \cdot e^{+\gamma x}). \quad (3.30)$$

Обозначив волновое сопротивление

$$Z_B = \frac{(R + j\omega L)}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (3.31)$$

запишем значение тока

$$I = \frac{1}{Z_B} (A \cdot e^{-\gamma x} - B \cdot e^{+\gamma x}). \quad (3.32)$$

Полученные напряжение и ток представим в виде двух составляющих – комплексных амплитуд напряжений (токов) падающей и отраженной волн:

$$U = A \cdot e^{-\gamma x} + B \cdot e^{+\gamma x} = U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}}; \quad (3.33)$$

$$I = \frac{A}{Z_B} e^{-\gamma x} - \frac{B}{Z_B} e^{+\gamma x} = I_{\text{пад}} + I_{\text{отр}}. \quad (3.34)$$

Установим соотношение между комплексными амплитудами падающих и отраженных волн в однородной цепи. В любой точке цепи, т.е. при любых x , соотношения

$$\frac{U_{\text{пад}}}{I_{\text{пад}}} = -\frac{U_{\text{отр}}}{I_{\text{отр}}} = Z_B. \quad (3.35)$$

Таким образом, отношение комплексных амплитуд напряжения и тока в падающей (отраженной) волне в любом сечении линии определяется волновым сопротивлением, которое свойственно данной цепи и где зависит от ее длины.

Соотношение: все между комплексными амплитудами напряжения (тока) падающей волны и напряжения (тока) отраженной волны различно в различных сечениях цепи. Токи и напряжения в любой точке цепи обусловлены ее волновым сопротивлением и коэффициентом распространения, которые носят название волновых или вторичных параметров цепи.

3.5. Вторичные параметры направляющих систем

Вторичными параметрами направляющей системы часто пользуются на практике как наиболее просто поддающимися измерению. В свою очередь Z и γ полностью определяются первичными параметрами цепи R, L, C, G .

Волновое сопротивление - это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной линии без отражения. По своей физической природе величина волнового сопротивления не зависит от длины волны и постоянна в любой точке цепи.

В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной и определяется через первичные параметры:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_B| \cdot e^{-j\varphi_B} \quad (3.36)$$

Как видно из (3.36), волновое сопротивление не зависит от длины для однородной цепи, а его частотную зависимость определяют первичные параметры.

При постоянном токе модуль волнового сопротивления составит

при постоянном токе модуль волнового сопротивления

$$\text{вит } |Z_B| = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}}, \text{ а фаза равна нулю } \varphi_B = 0.$$

В диапазоне относительно низких (тональных) частот волновое сопротивление, Ом, составляет

$$Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.38)$$

В диапазоне высоких частот волновое сопротивление, Ом, равно

$$Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.38)$$

фаза волнового сопротивления равна нулю $\varphi_B = 0$

В диапазоне средних частот необходимо пользоваться полной формулой. Частотная зависимость волнового сопротивления показана на рис. 3.8.

В кабельных линиях угол волнового сопротивления всегда отрицательный и по абсолютной величине не превышает 45° , что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей и емкостном характере волнового сопротивления кабелей.

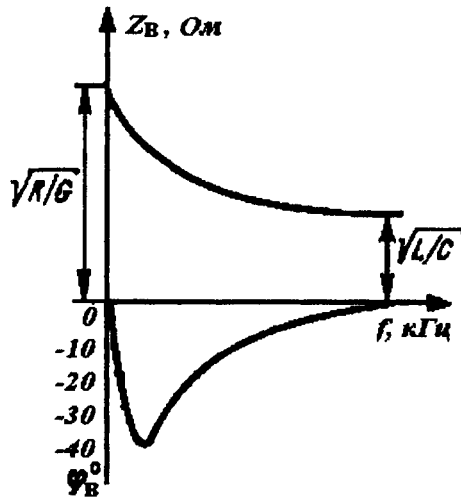


Рис. 3.8. Частотная зависимость волнового сопротивления

Коэффициент распространения (1/км) является комплексной величиной и может быть представлен в виде суммы ее действительной и мнимой частей:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \quad (3.39)$$

Действительная часть α и мнимая часть β характеризуют соответственно затухание и изменение фаз тока и напряжения, а та же мощности на участке цепи длиной 1 км и называются коэффициентом затухания и коэффициентом фазы.

Уменьшение или ослабление энергии объясняется двумя видами потерь - потерями в металле и потерями в диэлектрике. При прохождении тока по цепи нагреваются токопроводящие жилы создаются тепловые потери энергии. С ростом частоты эти потери увеличиваются, так как возрастает активное сопротивление (увеличивается интенсивность вихревых токов).

Потери энергии в изоляции обусловлены несовершенством применяемых диэлектриков (G_0) и затратами энергии на диэлектрическую поляризацию ($G_{пер.}$).

Углом $\varphi = -\beta l$ характеризуют изменение угла векторов тока или напряжения на участке цепи длиной l . Величина $a = \alpha l$ носит название собственного затухания цели (затухание сигнала в согласованно нагруженной однородной цепи).

Затухание принято оценивать в децибелах (дБ):

$$a = \alpha l = 20 \lg \left| \frac{U_0}{U_l} \right| = 20 \lg \left| \frac{I_0}{I_l} \right| = 10 \lg \left| \frac{P_0}{P_l} \right|, \quad (3.40)$$

где P_0 и P_l - мощность в начале и конце линии.

Затухание в 10 дБ соответствует уменьшению мощности в 10 раз, а тока или напряжения в 3,17 раза.

Коэффициент фазы β измеряется в радианах или градусах на 1 км (1 рад = 57,3°).

Расчетные формулы коэффициентов a и R через первичные параметры передачи могут быть получены из выражений

$$\alpha^2 + \beta^2 = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}; \quad (3.41)$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = RG - \omega^2 LC.$$

Решая эти уравнения относительно α (дБ/км) и β (рад/км), получаем

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 8,7 \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]} \\ \beta &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]} \end{aligned} \right\} (3.42)$$

Эти формулы можно упростить для различных диапазонов частот.

На постоянном токе $\alpha = \sqrt{R_0 G_0}$, $\beta = 0$; в тональном диапазоне, когда $R \gg \omega L$ и $G \ll \omega C$,

$$\alpha = 8,7 \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}; \quad (3.43)$$

в диапазоне высоких частот, когда $\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$, формулы для расчета коэффициентов затухания и фазы примут вид:

$$\alpha = \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \cdot 8,69 \text{ дБ/км},$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \text{ рад/км}, \quad (3.44)$$

где $\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ характеризует потери в металле, а $\frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ — потери в диэлектрике.

Характер частотной зависимости коэффициентов α и β приведен на рис. 3.9.

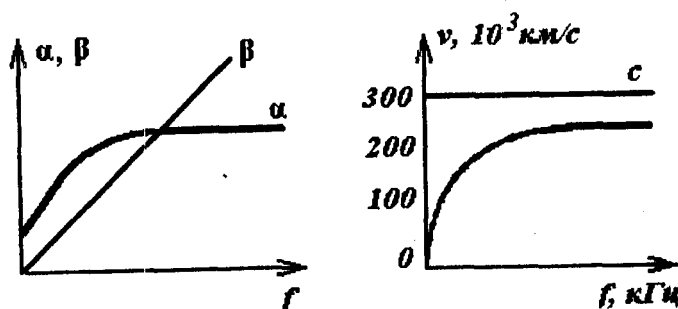


Рис. 3.9. Частотная зависимость коэффициента затухания, коэффициента фазы и скорости распространения электромагнитной волны

Для практических расчетов вторичные параметры цепей записывают в следующем виде:

коэффициент ослабления

$$\alpha = a\sqrt{\omega} + b\omega + \alpha_0, \quad (3.45)$$

где первый член характеризует потери в металле, второй - в диэлектрике, третий - значение потерь при постоянном токе;

коэффициент фазы

$$\beta = a_1\omega + a\sqrt{\omega}, \quad (3.46)$$

где $a_1 = t_3 = \sqrt{L_{\text{внеш}} C}$ - время задержки электромагнитной энергии в цепи, с/км;

a - коэффициент нелинейности коэффициента фазы.

Коэффициенты a , b , a_0 , a_1 , определяются конструктивными параметрами цепей или по экспериментальным частотным зависимостям α и β рассматриваемой цепи.

В высокочастотном диапазоне потери в проводниках цепей намного превышают потери в диэлектрике, и с определенной погрешностью можно пользоваться следующими выражениями:

$$\alpha = a\sqrt{\omega} + \alpha_0, \quad \beta = \omega t_3 + a\sqrt{\omega}. \quad (3.47)$$

Скорость распространения электромагнитной энергии по цепи связи. Электромагнитная энергия распространяется по цепи связи с определенной скоростью. Скорость передачи зависит от параметров цепи и частоты тока. Она определяется выражением:

$$v = \frac{\omega}{\beta}.$$

Скорость распространения зависит от коэффициента фазы β , т.е. коэффициент фазы обуславливает скорость движения энергии по линии. В диапазоне высоких частот скорость не зависит от частоты и определяется лишь параметрами кабеля:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.48)$$

На рис. 3.9 показана частотная зависимость скорости распространения электромагнитной волны по кабельной линии.

3.6. Физические процессы при передаче импульсных сигналов.

Для выявления качественной картины распространения импульсных сигналов в линии связи предположим, что коэффициент затухания цепи не зависит от частоты ($a = \text{const}$), а коэффициент фазы - линейная функция частоты ($\beta = \omega\sqrt{LC}$). Такими качествами обладают цепи, у которых первичные параметры удовлетворяют так называемому условию Хевисайда $LC=CR$ (при этом

$$Z_n = \sqrt{L/C}, \quad \alpha = \sqrt{RG}, \quad \beta = \omega\sqrt{LC}.)$$

Если такая цепь нагружена согласованно, то комплексные амплитуды напряжений и токов в ней определяются уравнениями

$$\begin{aligned} U &= U(x) = U_0 e^{-\gamma x} = U_0 e^{-\gamma\alpha} e^{-j\omega\sqrt{LC}x}; \\ I &= I(x) = I_0 e^{-\gamma x} = I_0 e^{-\gamma\alpha} e^{-j\omega\sqrt{LC}x}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

При принятом условии сигналы по цепи будут передавать без искажения их формы, так как при

$\beta = \omega \sqrt{LC}$ все частотные составляющие сигнала распространяются вдоль цепи с одной и той же скоростью $v_{\phi} = 1/\sqrt{LC}$ и в любой данной точке цепи испытывают одинаковое затухание $e^{-\alpha x}$.

В реальных цепях в общем случае коэффициент затухания является частотно-зависимым (3.47), а коэффициент фазы имеет нелинейность в низкочастотном диапазоне. Поэтому при передаче импульсных сигналов по реальным цепям возникают не только изменения их амплитуды, но и искажение формы.

Для оценки качества передачи по цепям импульсных сигналов пользуются ее временными характеристиками передачи (ВХП) переходной функцией $h(t)$ или импульсной переходной функцией $g(t) = dh(t)/dt$.

С физической точки зрения $h(t)$ – напряжение на выходе цепи при воздействии на его вход единичного скачка напряжения $U_{вх}(t) = 1(t)$; $g(t)$ – напряжение на выводе цепи при воздействии на ее вход прямоугольного импульса в виде дельта-функции ($\delta(t)$). При этом из теории электрических цепей известно, что частотные и временные характеристики цепи взаимно связаны и могут быть выражены друг через друга преобразованиями Лапласа или Фурье.

3.7. Переходные и импульсные характеристики кабельных цепей.

Для оценки искажений импульсных сигналов при передаче их по кабельным цепям необходимо иметь импульсные и переходные характеристики цепей. При определении переходных и импульсных характеристик комплексный коэффициент передачи согласованно нагруженной цепи в операторной форме может быть представлен выражением

$$T(p) = \frac{U_l}{U_0} = e^{-\gamma(p)l}. \quad (3.50)$$

В диапазоне работы высокочастотных кабелей потери в диэлектрике пренебрежимо малы по сравнению с потерями в проводниках цепей, поэтому согласно (3.47)

$$\gamma(p) = \alpha_0 + a \sqrt{\frac{p}{j}} + pt_3 + a \sqrt{jp} = \alpha_0 + pt_3 + a \sqrt{2p}. \quad (3.51)$$

Тогда комплексные L-отображения реакции цепи на скачок напряжения и дельта-импульс будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} F(p) &= 1(t) \exp \left[-(\alpha_0 + pt_3 + a \sqrt{2p})l \right]; \\ F'(p) &= \delta(t) \exp \left[-(\alpha_0 + pt_3 + a \sqrt{2p})l \right] \end{aligned} \quad (3.52)$$

Найдем обратные преобразования Лапласа от функций $F(p)$ и $F'(p)$. На основании свойств преобразований Лапласа первый множитель $e^{-\alpha l}$ вносится за знак преобразования как не зависящий от p . Вторым множителем на основании теоремы о сдвиге дает сдвиг по оси t на величину t_3 , что соответствует запаздыванию сигнала. Третий множитель определяется по таблицам функций Лапласа. Для функции $\Phi(z)$, называемой интегралом вероятности, есть таблицы [9].

Таким образом, окончательное решение будет

$$h(t) = e^{-\alpha_0 l} \left[1 - \Phi \left(\frac{al}{\sqrt{2} \sqrt{t-t_3}} \right) \right], \quad t > t_3,$$

или

$$h(t_1) = e^{-\alpha_0 l} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{N}{t_1}} \right) \right], \quad (3.54)$$

где $t_1 = t - t_3$; $N = (al)^2 / 2$.

Константу N можно выразить через затухание цепи. Так как $\alpha = a\sqrt{\omega} + \alpha_0$, то

$$N = \frac{(\alpha_n - \alpha_0)^2 l^2}{4\pi f_n}, \quad (3.55)$$

Из (3.54) видно, что между величинами $\ln(a)$ и $\ln(f)$ существует линейная зависимость, поэтому затухание может быть взято при любой частоте f_n .

Импульсная характеристика, являющаяся оригиналом выражения (3.52), имеет вид:

$$g(t_1) = \begin{cases} 0, & \text{при } t_1 < 0, \\ \exp(-\alpha_0 l) \sqrt{\frac{N}{\pi}} t_1^{-3/2} \exp\left(-\frac{N}{t_1}\right), & \text{при } t_1 \geq 0. \end{cases} \quad (3.55)$$

Для удобства пользования выражениями (3.53) и (3.55) в инженерных расчетах переходную и импульсную характеристики нормализуют. Для этого вводят безразмерную величину $q = t_1 / N$.

Тогда выражения примут вид:

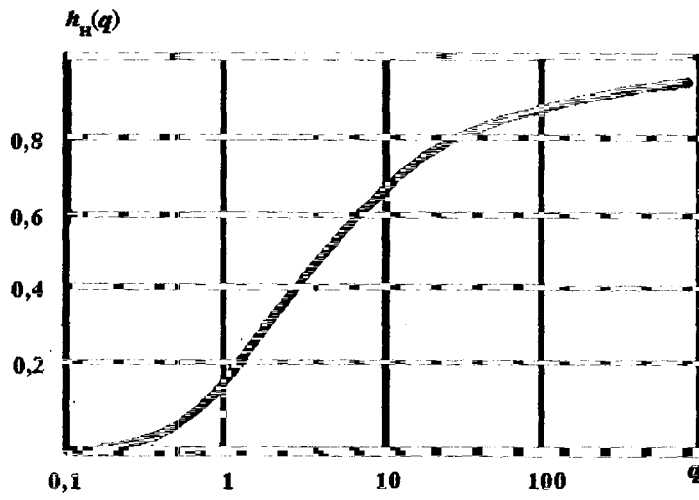
$$h_n(q) = \left[1 - \Phi \left(\frac{1}{\sqrt{q}} \right) \right] e^{-\alpha_0 l}, \quad \text{при } q \geq 0; \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} g_n(q) &= \exp(-\alpha_0 l) \sqrt{\frac{N}{\pi}} (Nq)^{-3/2} \exp\left(-\frac{1}{q}\right) \\ &= \frac{q^{-3/2}}{N\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{1}{q}\right), \quad \text{при } q \geq 0. \end{aligned} \quad (3.57)$$

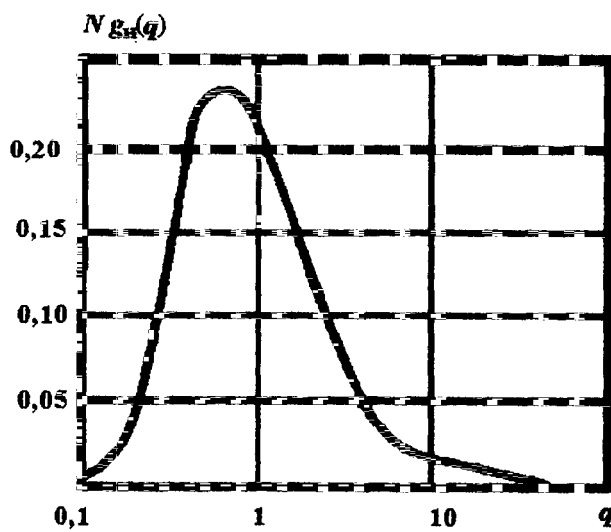
Графики этих функций приведены на рис. 3.10, а.

Для нахождения графика переходной функции $h(t_1)$ конкретной кабельной цепи сначала вычисляют величину N по (3.54), а затем значения по оси абсцисс (рис. 3.10) умножают на величину N .

При определении графика импульсной характеристики $g(t_1)$ конкретной кабельной цепи значения на оси ординат рис. 3.10, б делят, а значения на оси абсцисс умножают на N .



а)



б)

Рис. 3.10. Нормированные переходная (а) и импульсная (б) характеристики цепи

3.8. Искажения прямоугольного импульса при передаче по кабельным цепям

Определим форму импульса на выходе согласованно нагруженной цепи, если на его вход подан импульс прямоугольной формы длительностью t_n , и амплитудой, равной единице. Напряжение входного импульса можно записать в виде:

$$u_{\text{вх}}(t) = 1(t) - 1(t - t_n). \quad (3.58)$$

Реакцией цепи в нормализованном виде на воздействие единичной функции без учета времени задержки и $e^{\alpha t}$ на основании (3.56) является

$$h_n(q) = \left[1 - \Phi \left(\frac{1}{\sqrt{q}} \right) \right] \cdot 1(q). \quad (3.59)$$

Введем безразмерную нормализованную длительность импульса $\tau = t_n/N$. Пользуясь выражением для $h_n(q)$ и методом наложения, запишем реакцию цепи на воздействие импульса прямоугольной формы

$$u_{\text{вых}}(q) = \left[1 - \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right) \right] \cdot 1(q) - \left[1 - \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{q-\tau}}\right) \right] \cdot 1(q-\tau). \quad (3.60)$$

Пользуясь выражением (3.60) и таблицами интеграла вероятности $(1-\Phi(1/q))$, можно построить графики функции $u_{\text{вых}}(t_1/t_n)$ для различных цепей (с различными значениями N) (рис. 3.11). Из графиков легко видеть характер искажения прямоугольного импульса длительностью t_n в цепях с различным затуханием или различной длиной. В результате искажений фронт импульса становится пологим, вершина импульса запаздывает.

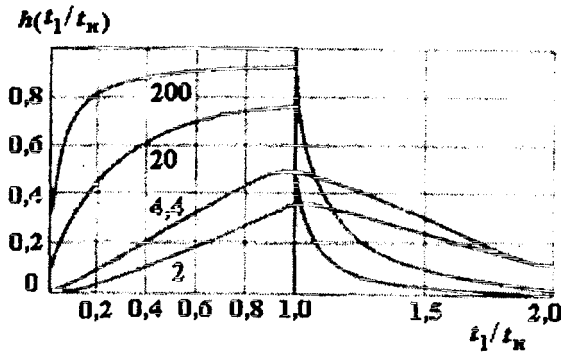


Рис. 3.11. Искажения прямоугольного импульса на выходе цепи

Для значений $t_n > 4N$ максимальное значение импульса соответствует моменту, когда вступает в силу второй член выражения (3.60), поэтому при $t_n > 4N$

$$u_{\text{max}} = u_0 \cdot \Phi\left(\frac{1}{t_n/N}\right), \quad (3.61)$$

где u_0 – амплитуда импульса на входе цепи.

Длительность фронта выходного импульса, отсчитываемую уровне 0,1 и 0,9 максимального значения импульса, можно определить для различных t_n/N из (3.60, 3.61). График зависимое относительной длительности фронта импульса от нормированной длительности импульса приведен на рис. 3.12.

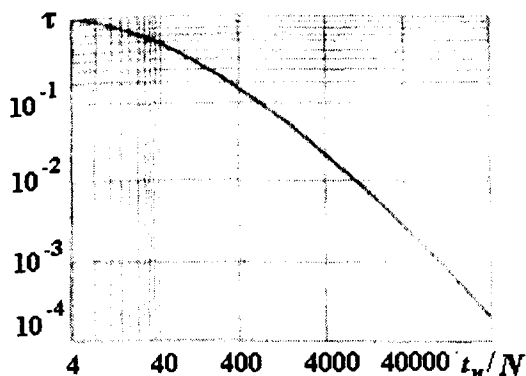


Рис. 3.12. График зависимости относительной длительности фронта прямоугольного импульса от нормированной длительности импульса

Зная затухание и длину цепи, можно найти величину. По известной длительности входного импульса находим отношение t_n/N и по графику определяем τ , т.е.. находим относительную длительность фронта импульса на выходе цепи.

Раздел 4

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ПО ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЯМ

4.1. Основные сведения о ВОЛС

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) - это вид систем передачи, при котором информация передаётся по оптически диэлектрическим волноводам, называемым «оптическое волокно».

Волоконно-оптическая сеть - это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи.

Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю.

Достоинства ВОЛС:

1. Широкая полоса пропускания обусловлена высокой частой несущей 10^{14} Гц. Это даёт потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду;
 2. Низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания путем передачи различно модуляции сигналов с малой избыточностью кода;
 3. Высокая помехозащищенность объясняется тем, что волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования. многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения;
 4. Малое затухание светового сигнала в волокне позволяет строить участки линий без ретрансляции протяженностью до 100 километров и более;
 5. Малый вес и объем; внешний диаметр оптического кабеля, (1,5 см) в несколько раз меньше медного телефонного кабеля такой же пропускной способностью;
 6. Высокая защищенность от несанкционированного доступа обусловлена тем, что ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приемо-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности ВОЛС могут мгновенно отключи «взламываемый" канал связи и подать сигнал тревоги;
 7. Гальваническая развязка элементов сети - данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно позволяет избежать электрических «земельных» петель;
 8. Взрыво- и пожаробезопасность - из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях;
 9. Экономичность - волокно изготавливают из кварца, более распространённого, в отличие от меди, материала. При этом ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции (уменьшается количество повторителей на протяженных линиях);
 10. Длительный срок эксплуатации - срок службы ВОК составляет 25 лет, за это время может смениться несколько поколений стандартов приемо-передающей аппаратуры.
 11. Наряду с преимуществами, волоконно-оптические системы имеют ряд недостатков, обусловленных главным образом дороговизной прецизионного монтажного оборудования и надежностью лазерных источников излучения.
- Высока стоимость интерфейсного оборудования (оптические приемники и передатчики, пассивное коммутационное оборудование, оптические соединители и разветвители). Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке ВОЛС также остаётся высокой.

Несмотря на перечисленные недостатки, преимущества от применения ВОЛС значительны, поэтому дальнейшее развитие технологии ВОЛС в информационных сетях является перспективным.

4.2. Типовая схема системы волоконно-оптической связи, основные компоненты ВОЛС.

По существу ВОЛС состоит из модулей и узлов, которые присутствуют в любой радиотехнической системе передачи информации. Ряд особенностей оптического диапазона и используемой в нем элементной базы накладывает свои ограничения на конструкцию отдельных узлов системы или приводит к техническим решениям, отличным от традиционных. Существуют аналоговые и цифровые волоконно-оптические системы связи. Из-за значительной сложности обеспечения требуемых качественных показателей оптического тракта аналоговые системы не получили широкого распространения и большинство современных ВОЛС предназначены для передачи цифровых сигналов.

Типовая схема системы связи, использующей ВОЛС, показана на рис. 4.1.

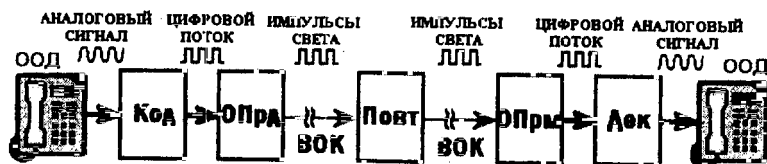


Рис. 4.1. Типовая схема системы связи с использованием ВОЛС «точка-точка»

Аналоговый сигнал, генерируемый оконечным оборудованием данных (ООД), например, телефоном, терминалом, видеокамерой и т.д., приходит на узел коммутации, где аналого-цифровой преобразователь - кодер (Код) оцифровывает его в цифровой поток. Цифровой поток используется для модуляции оптического передатчика (ОПрд), который передает серию оптических импульсов в оптическое волокно - волоконно-оптический кабель (ВОК). На приемной стороне импульсы света преобразуются обратно в цифровой поток при помощи оптического приемника (ОПрм). Декодерная часть коммуникационной системы (Дек) преобразует бинарный электрический лоток в аналоговый сигнал ООД. Для организации двунаправленного канала связи кодеры и декодеры, а также оптические приемники и передатчики совмещаются в одном устройстве.

Оптический передатчик (ОПрд) обеспечивает преобразование входного электрического (цифрового или аналогового) сигнала в выходной световой (цифровой или аналоговый) сигнал. Для этой цели используются инфракрасные светоизлучающие диоды LED или лазерные диоды LD. Эти устройства способны поддерживать модуляцию излучаемого света с мегагерцовыми и даже гигагерцовыми частотами.

Основными параметрами оптического передатчика являются: длина волны излучения λ , мкм (микрометров); ширина полосы оптического излучения (для светодиода $\Delta\lambda=(30...50)$ нм, для лазерного диода $\Delta\lambda=(0,1...3)$ нм); достигаемая выходная мощность излучения $P_{изл}$, Вт; быстродействие; срок службы (время наработки на отказ); стоимость.

Оптический приемник (ОПрм) осуществляет обратное преобразование входных оптических импульсов в выходные импульсы электрического тока. В качестве основного элемента оптического приемника используются р-і-п и лавинные фотодиоды. Основными параметрами оптического приемника являются: чувствительность, Вт (минимальная мощность входного сигнала); эквивалентная мощность шума, Вт; время наработки на отказ.

Если приемная и передающая станции удалены друг от друга на значительное расстояние (несколько сот километров), то может потребоваться одно или несколько промежуточных

регенерационных устройств для усиления ослабевающего в процессе распространения оптического сигнала, а также для восстановления фронтов импульсов. В качестве таких устройств используются повторители и оптические усилители.

Повторитель (Повт) состоит из оптического приемника, электрического усилителя и оптического передатчика. При передаче дискретного сигнала электрическое усиление также может сопровождаться восстановлением фронтов и длительностей передаваемых импульсов. Повторитель, который восстанавливает форму оптического сигнала до первоначальной, называется регенератором.

Оптический усилитель не осуществляет оптоэлектронного преобразования, он, используя специальные активные среды и лазеры накачки, непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал, благодаря индуцированному излучению. Усилитель не наделен функцией восстановления скважности, но качество сигналов, передаваемых по оптическому волокну, остается очень высоким вследствие малых дисперсии и затухания. Поэтому ретрансляция передаваемых данных простым усилением без полной регенерации становится весьма эффективной. Оптический усилитель является более универсальным устройством, поскольку в отличие от регенератора, он не привязан к стандарту передающегося сигнала или определенной частоте модуляции.

Волоконно-оптический кабель (ВОК). В качестве направляющей системы в оптических кабелях используют диэлектрические волноводы или оптические волокна, называемые так из-за малых поперечных размеров. Диэлектрические волноводы оптического диапазона называют также световодами. Связь обычно происходит по двум световодам, каждый из которых обеспечивает передачу информации в одном направлении. В принципе, обмен информацией может производиться по одному волокну в двух направлениях в случае применения направленного оптического ответвителя. Такое решение не находит широкого применения на практике из-за существенных потерь энергии в таких элементах и связанного с этим значительного сокращения дальности связи.

4.3. Типы световодов

Простейший световод представляет собой круглый диэлектрический стержень, называемый сердцевинной, окруженный диэлектрической оболочкой. Показатель преломления материала сердцевины $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$, а оболочки $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$, где ϵ_1 и ϵ_2 - относительная диэлектрическая проницаемость. Показатель преломления оболочки обычно постоянен, а сердцевины (в общем случае) является функцией поперечной координаты. Эту функцию называют профилем показателя преломления.

Если сердцевина световода имеет постоянное по радиусу значение показателя преломления, то такие световоды называются световоды со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 4.2, а) (есть ступенька n на границе сердцевина-оболочка).

Если показатель преломления от центра к краю изменяется не ступенчато, а плавно, то такие световоды называются световодами с градиентным профилем показателя преломления, или градиентными световодами (рис. 4.2, б).

Наибольшее распространение получили градиентные световоды с параболическим профилем показателя преломления:

$$n(r) = \sqrt{n_1 \cdot [1 - 2\Delta \cdot (2r/d)^2]}, \quad (4.1)$$

где n_1 – показатель преломления в центре сердцевины ($\approx 1,5$);

r – текущий радиус;

d – диаметр сердцевины;

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)^2}{n_1^2} = 0,003 \dots 0,01 \quad (4.2)$$

– относительная разность показателей преломления.

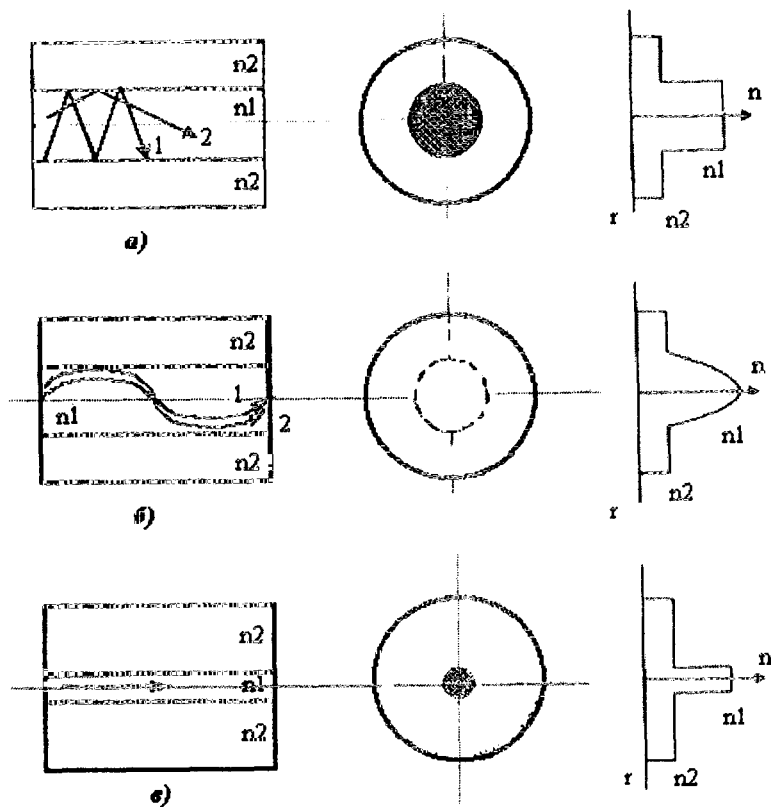


Рис. 4.2. Ход лучей в ступенчатом (а), градиентном (б) и одномодовом (в) оптическом волокне

Выбор соотношения между показателями преломления определяется в зависимости от назначения и области применения волокна. Кроме того, ступенчатые ОВ могут иметь несколько отражающих оболочек (волокно W-типа), с сердцевиной из материала с показателем преломления n_1 , окруженной двумя оболочками, первая из которых имеет показатель преломления n_2 , а вторая - n_3 , причем $n_1 > n_2 > n_3$.

Для передачи электромагнитной энергии по световоду используется известное явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектрических сред. Лучи распространяются в оптически более плотной среде, окруженной менее плотной, поэтому необходимо $n_1 > n_2$. В зависимости от угла $\Theta_{кр}$, который образуют с осью лучи, выходящие из точечного источника в центре торца световода (рис. 4.3), имеют место волны излучения, волны оболочки (вытекающие лучи) и сердцевины (направляемые лучи).

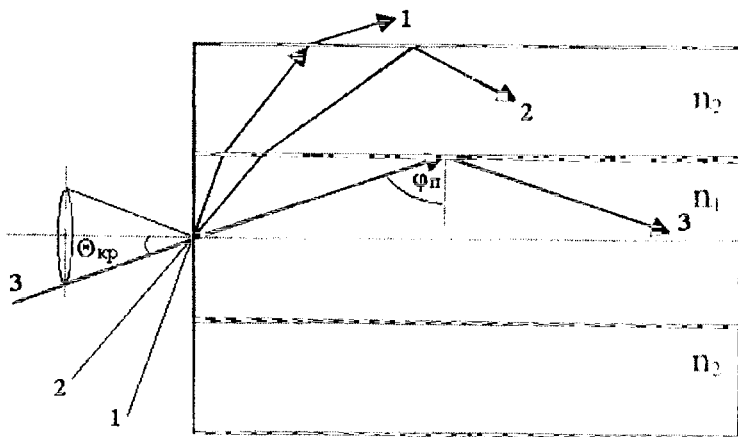


Рис. 4.3. Распространение излучения по оптическому волокну

Если угол падения меньше некоторого критического угла, который определяется соотношением

$$\sin \Theta_{кр} = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}, \quad (4.3)$$

то луч полностью отражается на границе сердцевина - оболочка и остается внутри сердцевины (луч 3). Этот угол соответствует углу полного внутреннего отражения $\varphi_{п}$.

Ход лучей в градиентном световоде показан на рис. 4.2, б. Как видно из рисунка, лучи изгибаются в направлении градиента показателя преломления (вместо преломления или полного отражения, как в случае волокна со ступенчатым профилем). Таким образом, градиентные волокна ведут себя подобно средам с распределенным линзовым эффектом, в которых световой пучок в процессе распространения подвергается непрерывной подфокусировке. Это позволяет уменьшить искажения сигналов, передаваемых по оптическим световодам. С точки зрения геометрической оптики в ступенчатом световоде лучи, вошедшие в сердцевину под разными углами Θ (различные частотные составляющие), проходят разные пути, например лучи 1 и 2 на рис. 4.2, а.

В градиентном световоде лучи 1 и 2 (рис. 4.2, б), вошедшие в сердцевину под разными углами, движутся также по различным траекториям, но луч 1 проходит в области с меньшим показателем преломления n и, соответственно, обладает большей скоростью, а луч 2 проходит в области с большим n и обладает меньшей скоростью распространения, поэтому к оси волокна они возвращаются одновременно. Изменяя профиль показателя преломления сердцевины, можно получать требуемые характеристики градиентного волокна.

Режим полного внутреннего отражения зависит от диаграммы направленности источника излучения. Величину $\Theta_{кр}$ называют апертурным углом.

Апертурой называется максимальный угол между оптической осью и световым лучом, падающим на торец многомодового волоконного световода, при этом выполняются условия полного внутреннего отражения в сердцевине (луч 3 на рис. 4.3). Величина апертурного угла зависит от абсолютного значения показателя преломления сердцевины и разности показателей преломления сердцевины и оболочки, то есть апертура и предельный угол полного внутреннего отражения имеют определенную функциональную взаимосвязь. Таким образом, световод пропускает лишь лучи, заключенные в конусе с углом $\Theta_{кр}$, соответствующим $\varphi_{п}$ -углу полного внутреннего отражения. Физически апертура характеризует способность световода принимать световую энергию.

Наряду с понятием апертура принято использовать также понятие числовая апертура (от англ. Numerical Aperture):

$$NA = n_0 \sin \Theta_{кр} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (4.4)$$

где n_0 - показатель преломления наружной среды (равен 1, если торец световода граничит с воздухом).

От значения числовой апертуры зависит эффективность ввода излучения лазера или светодиода в световод, потери в микроизгибах, дисперсия импульсов, число распространяющихся мод.

Как видно из рис. 4.3, между предельным углом полного внутреннего отражения $\varphi_{п}$ и апертурным углом падения луча имеется взаимосвязь. Чем больше угол $\varphi_{п}$ тем меньше апертурный угол волокна $\Theta_{кр}$.

Луч в торец световода следует вводить под углом, меньшим апертурного угла волокна $\Theta_{кр}$. До тех пор, пока угол падения луча меньше, чем $\Theta_{кр}$, луч будет испытывать полное внутреннее отражение на границе сердцевина - оболочка и передача будет проходить эффективно.

Равенство числовых апертур является одним из необходимых условий достижения малых потерь в разъемных и неразъемных соединителях волоконных световодов.

Следует иметь в виду, что из всей совокупности световых лучей в пределах угла полного внутреннего отражения для данного световода только ограниченное число лучей с дискретными углами может образовывать направляемые волны, которые также называют волноводными

модами. Эти лучи характеризуются тем, что после двух последовательных переотражений от границы сердцевина - оболочка волна должна быть в фазе. Если это условие не выполняется, то волны интерферируют так, что они гасят друг друга и исчезают.

Каждая волноводная мода обладает характерной для нее структурой электромагнитного поля, фазовой и групповой скоростями (имеет свою критическую частоту и длину волны).

В зависимости от условий распространения световой волны в сердцевине и числа распространяющихся мод оптические волокна делятся на две группы: одномодовые (SMF - Single Mode Fiber, (рис. 4.2, в)) и многомодовые (MMF- Mufti Mode Fiber).

Многомодовые оптические волокна бывают ступенчатыми и градиентными, а одномодовые оптические волокна могут иметь ступенчатый (стандартное ООВ), W-образный и треугольный (специальные) профили показателя преломления (рис. 4.4, 4.9).

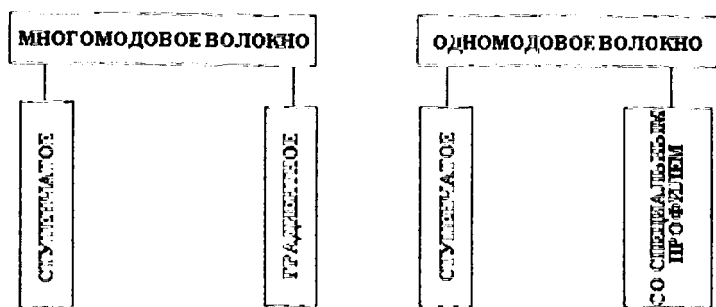


Рис. 4.4. Типы световодов

Число мод в световоде связано с числовой апертурой следующими простыми соотношениями:

для ступенчатого световода

$$N_{mod} = 2 \left[\pi \cdot NA \cdot \frac{a}{\lambda} \right]^2 ; \quad (4.4)$$

для градиентного световода

$$N_{mod} = \left[\pi \cdot NA \cdot \frac{a}{\lambda} \right]^2 , \quad (4.5)$$

где a – радиус сердцевины волокна,
 λ – длина волны.

4.4. Критическая частота и длина волны волоконного световода

При передаче электромагнитной энергии по волокну основная ее часть распространяется внутри сердцевины, часть же проникает в оболочку, где экспоненциально затухает. Степень уменьшения напряженности поля определяется волновым числом оболочки g_2 . При больших значениях волнового числа (высоких частотах) поле концентрируется внутри сердцевины. С уменьшением g_2 поле перераспределяется в пространстве вне сердцевины и при $g_2=0$ выходит из волокна (излучается). Частота, при которой это происходит, называется частотой отсечки, или критической частотой.

Критическая частота определяется при $g_2=0$ и имеет вид:

$$f_{кр} = \frac{V \cdot c}{2\pi a \cdot NA} , \quad (4.6)$$

где V – нормированная (характеристическая) частота волокна.

Характеристическая частота представляет собой обобщенный параметр, включающий диаметр сердцевины, длину волны и коэффициенты преломления сердцевины и оболочки:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA. \quad (4.7)$$

Таким образом, каждая мода имеет характеристическую частоту, которая определяет ее область существования. Тип мод определяется также параметром $V = P_{mn}$ (n характеризует число изменений поля по периметру световода, а m - по диаметру).

В табл. 4.1 приведены значения V для некоторых типов волн.

Таблица 4.1

Типы волн в оптическом волокне				
Значение $V=P_{mn}$ при m , равном				
n	1	2	3	Тип волны
0	2,405	5,520	8,654	E_{0m}, H_{0m}
1	0,000	3,832	7,016	HE_{1m}
1	3,832	7,016	10,173	EH_{1m}

Из табл. 4.1 видно, что только одна несимметричная мода HE_{11} имеет $V=0$, а следовательно, эта волна не имеет критической частоты и может распространяться при любой частоте и диаметре сердцевины.

Выбирая параметры световода (λ , d , n_1 , n_2) таким образом, чтобы следующие высшие моды с более высокими частотами отсечки не могли распространяться, можно получить режим распространения только одной (основной) моды HE_{11} .

Таким образом, при $0 << V < 2,405$ наблюдается одномодовый режим распространения.

Рабочая частота и диаметр сердцевины световода при одномодовом режиме выбираются из условий

$$f_0 \geq \frac{2,405 c}{2\pi a \cdot NA}; \quad (4.8)$$

$$d \leq \frac{2,405 \lambda_0}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}. \quad (4.9)$$

Практически одномодовый режим достигается при применении волокон с $d \approx \lambda$. Для увеличения d надо стремиться к уменьшению разницы между показателями преломления сердцевины и оболочки ($n_1 \approx n_2$).

С увеличением диаметра сердцевины и уменьшением длины волны число мод возрастает и устанавливается многомодовый режим передачи.

В настоящее время принято при работе на длинах волн $\lambda = (0,8 \dots 1,6)$ мкм применять световоды с диаметром сердцевины $d = (4 \dots 10)$ мкм для одномодовой передачи и для многомодовой передачи волокна с диаметром сердцевины 50 мкм и 62,5 мкм.

4.5. Единицы измерения оптической мощности

При расчете параметров линейно-кабельных сооружений оптической линии связи из-за экспоненциальной зависимости мощности сигнала от расстояния удобно пользоваться логарифмическими единицами, переход к которым позволяет свести основные расчеты мощностей сигналов к операциям сложения и вычитания.

В качестве нулевого уровня в технике оптической связи принято значение P_0 1 мВт, которое примерно соответствует максимальной мощности излучения типичного полупроводникового лазера и светодиода, а под уровнем мощности, дБм (децибелмилливатт), понимается величина

$$P = 10 \lg \frac{P_c}{P_0}, \quad (4.10)$$

где P_c – мощность оптического сигнала, Вт.

Таким образом, мощность оптического сигнала 1 мВт соответствует уровню 0 дБм, и т.д. При передаче сигнала по волоконнооптической линии часть мощности теряется в оптическом волокне, количественно потери мощности характеризуются важнейшим параметром световода - затуханием. Затухание определяет дальность передачи по оптическому кабелю и его эффективность.

4.6. Затухание сигнала в волоконных световодах

Затухание световодных трактов волоконно-оптических кабелей характеризуется собственными потерями в волоконных световодах ($\alpha_{\text{соб}}$) и дополнительными потерями, обусловленными деформацией и изгибами световодов при наложении покрытий и защитной оболочки при изготовлении кабеля ($\alpha_{\text{доп}}$).

Собственные потери волоконных световодов состоят в первую очередь из потерь поглощения $\alpha_{\text{п}}$ и потерь рассеяния $\alpha_{\text{р}}$.

$$\alpha_{\text{соб}} = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{доп}}. \quad (4.11)$$

Потери на поглощение существенно зависят от чистоты материала и при наличии посторонних примесей ($\alpha_{\text{пр}}$) могут быть значительными.

Затухание в результате поглощения $\alpha_{\text{п}}$ дБ/км, связано с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой, существенно зависит от свойств материала световода ($\text{tg } \delta$) и определяется по формуле

$$\alpha_{\text{п}} = 8,69 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi n_1 \cdot \text{tg } \delta}{\lambda}, \quad (4.12)$$

где n_1 - показатель преломления сердцевины;

λ - длина волны, мкм;

$\text{tg } \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь световода (для кварца составляет 10^{-10}).

Таким образом, частотная зависимость затухания в результате поглощения имеет линейный характер при постоянных значениях n .

Рассеяние обусловлено неоднородностями материала волоконного световода, размеры которых меньше длины волны, и тепловой флуктуацией показателя преломления. Потери на рассеяние, дБ/км, рассчитывают по формуле

$$\alpha_{\text{р}} = \frac{K_{\text{р}}}{\lambda^4}, \quad (4.13)$$

где $K_{\text{р}}$ - коэффициент рассеяния (для кварца (1...1,5) дБ/км·мкм⁴);

λ - длина волны, мкм.

Такое рассеяние называется рэлеевским, она растет с частотой пропорционально f^4 .

Потери на рэлеевское рассеяние определяют нижний предел потерь, присущих волоконным световодам.

Следует отметить принципиальную разницу между характеристиками затухания симметричных (E_{01} и H_{01}) и смешанном (HE_{11}) волн. Симметричные имеют критическую частоту $f_{кр}$, а смешанные ее не имеют.

Потери $a_{пр}$ возникают за счет посторонних примесей, таких как гидроксильные группы, наличие ионов посторонних металлов и других включений. Резонансное возбуждение атомов и молекул примесей приводит к резкому возрастанию потерь на определенных длинах волн.

Одномодовые световоды, из-за меньших размеров световедущей сердцевины, позволяют, добиться лучшей степени очистки материала и за счет этого имеют меньшее затухание, чем многомодовые.

Дополнительные потери (кабельные) обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, а также потерями в процессе инсталляции кабеля. Потери на изгибах световодов возникают из-за изменения угла падения световой волны на границу раздела сердцевина-оболочка. Для части лучей угол падения становится меньше угла отражения, в результате в месте изгиба появляется большое количество излучаемых и вытекающих мод, вызывающих рост потерь. Для уменьшения потерь из-за изгибов рекомендуется не допускать малых радиусов изгиба кабеля (рис. 4.5).

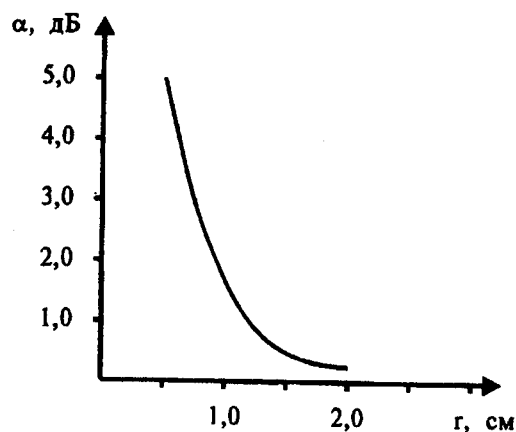


Рис. 4.5. Зависимость дополнительных потерь от радиуса изгиба световода

Минимальные потери во время прокладки и эксплуатации достигаются при радиусах изгиба кабеля не менее 10-20 его внешних диаметров. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля дополнительные потери составляют не больше 20% от полного затухания.

4.7. Окна прозрачности

Связь по волоконно-оптическим кабелям эффективна не на всех длинах волн, а только в определенных участках спектра, где достигаются минимальные потери. Области минимальных потерь получили название окон прозрачности (рис. 4.6).

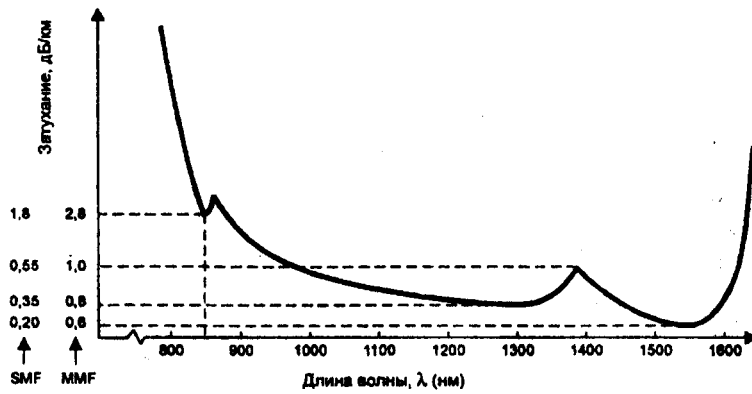


Рис. 4.6. Собственные потери в оптическом волокне

Для кварцевых световодов практический интерес представляют три окна прозрачности, перечисленные в табл. 4.2. Характеристики полупроводниковых излучателей и фотоприемников оптимизированы для работы в этих окнах.

Таблица 4.2

Окно прозрачности	Окна прозрачности	
	Длина волны, мкм	Затухание, дБ/км
1	0,85	3...2
2	1,3	0,3...1
3	1,55	0,2...0,3

Из табл. 4.2 видно, что переход из первого во второе окно прозрачности дает существенный выигрыш по величине затухания, тогда как работа в третьем окне большого выигрыша в величине потерь не приносит. С другой стороны, по мере увеличения рабочей длины волны начинает быстро расти стоимость активных оптоэлектронных компонентов. Исходя из этих двух обстоятельств, в технике локальных сетей, где из-за сравнительно малой протяженности кабельных трасс стоимость оконечной аппаратуры относительно велика, в подавляющем большинстве случаев используют первое и второе окна прозрачности. Линии дальней связи, стоимость которых определяется в первую очередь длиной участка регенерации, работают в основном во втором и третьем окнах прозрачности, где кроме низкого затухания достигается также малая величина дисперсии.