

Федеральное агентство связи
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Кафедра ЛС и ИТС

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

Направляющие системы связи

По специальности (направлению подготовки): 11.03.02 Инфокоммуникационные
технологии и системы связи

Самара
2017

УДК 621.395

Попов В.Б.

Направляющие системы связи. Конспект лекций. – Самара.: ПГУТИ, 2017. – 72 с.

В конспекте лекций приводится систематизированный материал по курсу «Направляющие системы связи» для бакалавров направления подготовки 11.03.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Рецензент:

Васин Н.Н. – д.т.н., зав.каф. «Систем связи» ФГБОУ ВО ПГУТИ

Содержание конспекта лекций

Содержание – перечень тем и разделов.....	
Список сокращений и обозначений.....	
Введение.....	
Лекция 1	
Тема 1. Современная электрическая связь. Построение сетей электросвязи	
Раздел 1.1. Обобщённая структурная схема системы электросвязи.	
Раздел 1.2. Характеристики радиоканалов.	
Раздел 1.3. Направляющие системы электросвязи.	
Раздел 1.4. Краткий обзор и этапы развития направляющих систем электросвязи	
Раздел 1.5. Основные разновидности НСЭ. Рабочий частотный диапазон	
Раздел 1.6. Принципы построения сетей электросвязи	
Раздел 1.7. Первичная и вторичная сети:	
Лекция 2	
Тема 2. Конструкции и характеристики направляющих систем электросвязи	
Раздел 2.1. . Общие положения	
Раздел 2.2. Электрические кабели связи	
Раздел 2.3. Оптические кабели связи	
Лекция 3	
Тема 3. Основы электродинамики направляющих систем электросвязи	
Раздел 3.1. Исходные положения электродинамики. Основные характеристики сред распространения электромагнитного поля.	
Раздел 3.2. Основные уравнения электродинамики в интегральной и дифференциальной форме	
Раздел 3.3. Система уравнений Максвелла в цилиндрических координатах для проводников	
Раздел 3.4. Граничные условия для векторов электромагнитного поля.	
Раздел 3.5. Баланс мощностей, теорема Умова – Пойнтинга	
Раздел 3.6. Режимы передачи по НСЭ. Классификация электромагнитных волн в НСЭ.	
Раздел 3.7. Классификация электромагнитных волн в НСЭ.	
Лекция 4	
Тема 4. Теория передачи по проводным направляющим системам электросвязи.	
Раздел 4.1. Исходные принципы расчета НСЭ.	
Раздел 4.2. Уравнение однородной двухпроводной линии.	
Раздел 4.3. 4.3 Процессы в неоднородных линиях.	
Лекция 5	
Тема 5. Теория передачи по проводным направляющим системам электросвязи.	
Раздел 5.1. Электрические процессы в коаксиальных цепях	
Раздел 5.2. Передача энергии по идеальной коаксиальной цепи.	
Раздел 5.3. Передача энергии по коаксиальной цепи с потерями	
Раздел 5.4. Емкость и проводимость изоляции коаксиальной цепи	
Раздел 5.5. Первичные и вторичные параметры коаксиальной цепи.	

Частотные зависимости параметров передачи.

Раздел 5.6 Электрические процессы в симметричных кабелях

Лекция 6

Тема 6 Теория передачи по проводным направляющим системам электросвязи

Раздел 6.1. Волоконные световоды. Принцип действия, параметры передачи.

Раздел 6.2. Волновая теория света.

Раздел 6.3. Затухание в оптических волокнах.

Раздел 6.4. Дисперсия оптических волокон

Раздел 6.5 Сравнение различных НСЭ.

Лекция 7

Тема 7. Взаимные влияния в направляющих системах электросвязи

Раздел 7.1. Общие понятия об электромагнитных влияниях

Раздел 7.2. Основные определения и методы исследования взаимных влияний

Лекция 8

Тема 8. Взаимные влияния в направляющих системах электросвязи

Раздел 8.1. Взаимные влияния в симметричных цепях связи .

Раздел 8.2. Взаимные влияния в коаксиальных цепях.

Раздел 8.3 Взаимные влияния в волоконно-оптических кабелях

Раздел 8.4 Нормирование параметров взаимных влияний

Лекция 9

Тема 9. Внешние влияния на направляющие системы электросвязи и меры защиты

Раздел. 9.1 Источники внешних электромагнитных влияний. Опасные и мешающие влияния на цепи связи.

Раздел 9.2. Меры защиты от внешних влияний. Экранирование кабелей связи

Лекция 10

Тема 10. Проектирование и строительство линейных сооружений связи

Раздел 10.1 Общие положения

Раздел 10.2 Задание на проектирование и исходные данные

Раздел 10.3 Технический надзор за строительством линейных сооружений связи.

Лекция 11

Тема 11. Основы технической эксплуатации линейных сооружений связи

Раздел 11.1 Общие положения

Раздел 11.2 Планово-профилактическое обслуживание линейно-кабельных сооружений

Раздел 11.3 Измерения при технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений.

Список сокращений и обозначений

БСЭ – Большая Советская Энциклопедия

VAD – Vapor Axial Deposition

MCVD – modified chemical vapor deposition

MASER– Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing

TAT-N – трансатлантическая кабельная линия.

Введение

Целью преподавания дисциплины «Направляющие системы электросвязи» является получение знаний об основных научно-технических проблемах и перспективах развития направляющих систем электросвязи, их интеграции с международными сетями связи, о принципах построения направляющих систем электросвязи, о проблемах повышения эффективности направляющих систем электросвязи; умение рассчитывать основные параметры направляющих систем электросвязи; умение использовать полученные знания для выполнения проектирования, строительства и эксплуатации направляющих систем электросвязи

Изучение данной дисциплины базируется на следующих дисциплинах:

1. Физика.
2. Теория электрических цепей.
3. Электромагнитные поля и волны.
4. Метрология, стандартизация и сертификация

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при изучении следующих дисциплин:

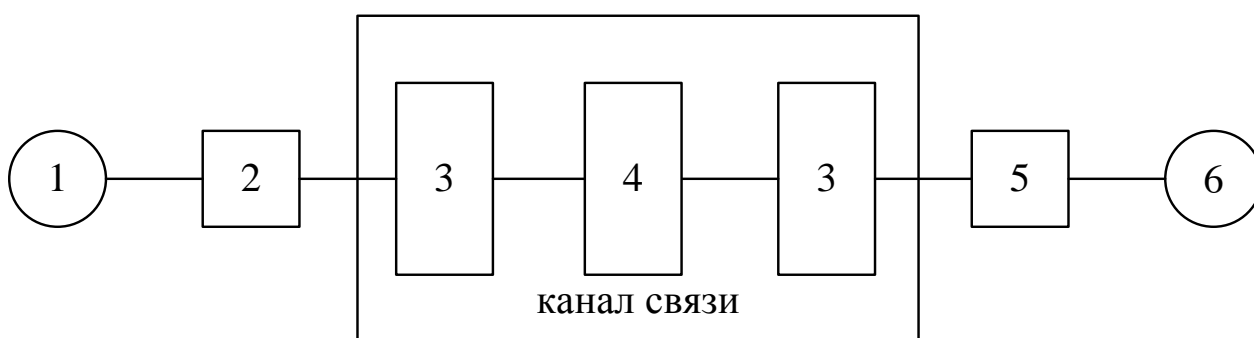
1. Цифровые многоканальные телекоммуникационные системы.
2. Фиксированные сети широкополосного доступа .
3. Оптические транспортные сети .
4. Основы проектирования, строительство и эксплуатация ВОЛП .

Основные положения дисциплины НСЭ будут использованы в дальнейшем при выполнении выпускной работы бакалавра.

Современная электрическая связь. Построение сетей электросвязи

1.1 Обобщённая структурная схема системы электросвязи.

Научно–технический прогресс не возможен без технических средств телекоммуникаций. Увеличение выпуска продукции в два раза требует увеличение объёма передаваемой информации в четыре раза. Причём основную роль в передаче информации играют средства связи.



1. Источник информационного сообщения (человек, ЭВМ, различные устройства телемеханики и управления).
2. Преобразователь информационного сообщения в электрический импульс или оптический сигнал.
3. Система передачи. (Многоканальные системы передачи преобразуют информационные электрические сигналы в единый линейный электрический или оптический сигнал).
4. Среда распространения линейного сигнала (в качестве такой среды может выступать свободное пространство или специальная система, конструктивно выполненная в виде направляющей системы электросвязи). На выходе среды распространения устанавливается МСП, выполняющая роль демультиплексирующего устройства (демультиплексора), задачей которого является преобразование группового линейного сигнала в индивидуальный оптический или электрический сигнал.
5. Преобразователь электрического или оптического сигнала в информационное сообщение.
6. Получатель информационного сообщения.

1.2 Характеристики радиоканалов.

Если в качестве среды распространения линейного сигнала используется свободное пространство, то такой канал называется радиоканалом. Его дальность может составлять от нескольких метров до сотен миллионов

километров. Кроме возможности связи на огромные расстояния радиоканалы дают возможность установления связи между подвижными объектами.

Достоинства:

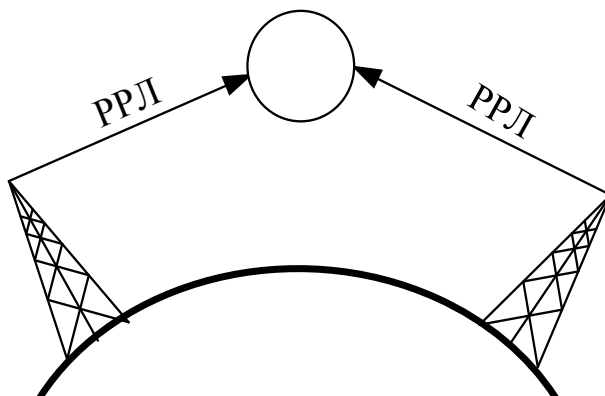
- ✚ Высокая скорость установления связи, неограниченное число абонентов, слушателей и зрителей.
- ✚ Единственный вариант связи с подвижными, а также удаленными и космическими объектами.
- ✚ Возможность организовывать связь с неограниченным количеством абонентов, слушателей, зрителей.

Недостатки:

- ✚ Зависимость качества связи от состояния распространения и сторонних электромагнитных полей, вызывающих помехи.
- ✚ Недостаточно высокая электромагнитная совместимость радиоканалов в диапазоне метровых волн, т.е. создать большое число каналов в диапазоне длинных и средних волн почти не возможно.
- ✚ Высокая цена и сложность аппаратуры, формирующей линейный сигнал. Сложность, высокая цена и большие размеры фидерного тракта.

С целью устранения данных недостатков в ходе развития радиосвязи осваивались более высокочастотные диапазоны дециметровых и сантиметровых волн. При этом уменьшались размеры антенн, канал меньше подвергался воздействию помех, обеспечивалась более устойчивая связь. Такие линии получили название радио–релейных линий (РРЛ). Тракт РРЛ – это сеть пунктов с установкой ретрансляционных станций на расстоянии 20 – 40 км. Недостаток их в том, что с них очень легко считывается информация.

Спутниковые линии связи



Недостаток спутниковых линий связи в том, что они очень дорого стоят, имеют ограниченный ресурс (срок службы) и могут быть легко уничтожены противником.

1.3 Направляющие системы электросвязи

Если в качестве среды распространения используется граница раздела двух сред, обладающих различными физическими свойствами (удельной проводимостью и магнитной проницаемостью), то такие каналы называют проводными. Совокупность сред, вдоль которых передаётся электромагнитная энергия линейного сигнала, называют направляющей системой. В общем случае направляющей системой являются и провода ЛЭП, и энергетические кабели. Поэтому направляющие системы для электросвязи имеют обозначение НСЭ.

В качестве простейших НСЭ используются двухпроводные металлические цепи. Вместе с дополнительными элементами и оконечными устройствами. Совокупность НСЭ и оконечных устройств электрической связи образует линейное сооружение связи, которое соединяет абонентов между собой и представляет собой единый комплекс.

1.4 Краткий обзор и этапы развития направляющих систем электросвязи

Возникновение первых направляющих систем электросвязи связано с изобретением свыше 150 лет назад телеграфа. При этом был создан кабель с резиновой изоляцией и медными проводниками (Москва - Петербург), который обладал плохими электрическими свойствами и малым сроком эксплуатации. Более удачной конструкцией НСЭ оказалась воздушная линия связи. В семидесятых годах девятнадцатого века со строительства ВЛС (Москва – Петербург – Варшава) началось бурное развитие и внедрение ВЛС, однако они обладали рядом недостатков:

- ✚ Громоздкость
- ✚ Малое число цепей и узкий частотный диапазон
- ✚ Существенная зависимость качества связи от погодных условий.

Поэтому в конце девятнадцатого века в Санкт – Петербурге начали использовать шведские кабели городской телефонной связи с бумажной изоляцией и свинцовой оболочкой. С изготовлением более качественных диэлектриков появились симметричные междугородные кабели, которые начали широко использоваться в России с середины сороковых годов. Недостатки симметричных кабелей - низкая помехозащищенность на высоких частотах. В начале пятидесятых годов получили развитие коаксиальные кабели, обладающие более широким частотным диапазоном, и имеющие хорошую защиту от взаимных и внешних влияний. И, начиная с шестидесятых годов, коаксиальные кабели – это основа магистральной связи, причём по одной коаксиальной паре организовались до 10000 телефонных каналов междугородней связи. Недостатки коаксиальных кабелей:

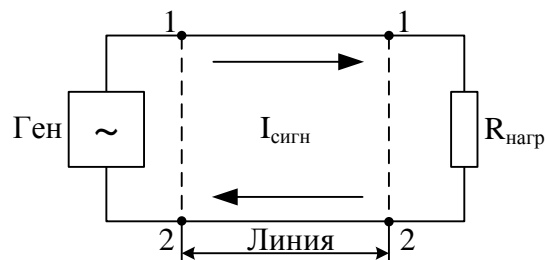
- ✚ Большая материалоёмкость, включая буферные цветные материалы.
- ✚ Малая длина усилительных участков

Этих недостатков лишены волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП).

1.5 Основные разновидности НСЭ. Рабочий частотный диапазон

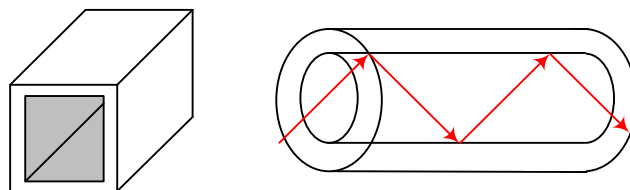
По конструкции все НСЭ можно разделить на два основных вида:

1. Двухпроводные направляющие системы электросвязи, в которых для передачи сигнала требуется наличие двух проводников.

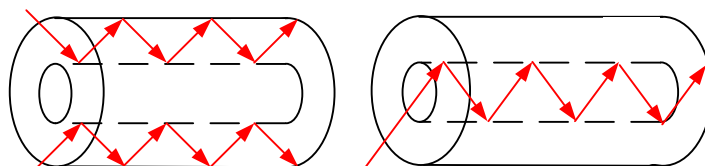


2. Волноводные направляющие системы электросвязи.

Они представляют собой конструкцию в виде полой трубы, изготовляемой из цветных металлов, или трубы прямоугольного сечения, внутри которой распространяется электромагнитная волна. Труба может быть круглого и прямоугольного сечения.



Частным случаем волноводов являются линии поверхностной волны, которые представляют собой металлический проводник в изоляции, на который подаётся волна очень высокой частоты. Частный случай волновода – волоконный проводник света. Здесь из стекла выполнены и сердцевина и оболочка.



Каждый тип НСЭ обладает определённым диапазоном частот, числом возможно организуемых каналов связи и соответствующей областью применения.

Разновидности НСЭ

Тип НСЭ	Частотный диапазон, Гц	Число каналов	Виды применения
ВЛС	$0 - 10^5$	15	Село, город, область.
СК	$0 - 10^6$	До 1000	Отводы от магистрали, связь внутри области.
КК, ЛПВ	$0 - 10^9$	До 10 000	Магистрали, отводы от магистрали, связь внутри обл.
РЧК	$0 - 10^{10}$	До 10 000	Антенно – фидерные устройства. (АФУ)
Металлические и диэлектрические волноводы	$10^{11} - 10^{13}$	До 100 000	АФУ
Световоды, оптические кабели, ВОЛП	$10^{14} - 10^{15}$	Свыше 1000 000	Все виды связи

Достоинства НСЭ по сравнению с радиоканалами

- ✚ Высокое качество и скорость передачи информации.
- ✚ Возможность обеспечения высокой электромагнитной защищённости каналов от взаимных и внешних помех.
- ✚ Высокая скрытность связи.
- ✚ Простота и низкая стоимость оконечных устройств.

Недостатки НСЭ

- ✚ Более низкая скорость установления соединения и передачи информации, чем по радиоканалам.

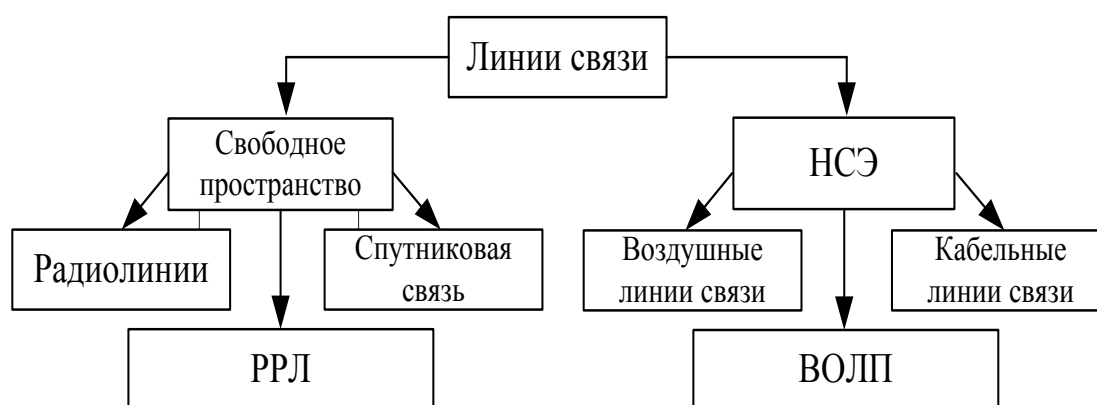
- ✚ Большие капитальные и эксплуатационные расходы по сравнению с радиоканалами. Однако более 70% всей сети электросвязи состоит из проводных каналов, и только 10%–15% составляют радиорелейные и спутниковые линии из-за существенных достоинств проводных каналов.

Таким образом, основой всей сети электросвязи являются НСЭ.

Различные типы каналов дополняют друг друга, работая совместно в определённых частотных диапазонах, которые разделены между различными средствами электросвязи, исходя из их электромагнитной совместимости. Согласно рекомендациям международного комитета весь частотный диапазон средств электросвязи подразделяется на следующие поддиапазоны:

- ✚ Сверхдлинные волны (3 – 10 кГц)
- ✚ Длинные волны (30 – 300 кГц)
- ✚ Средние волны (300 кГц – 3 МГц)
- ✚ Короткие волны (3 – 30 МГц)
- ✚ Ультракороткие (30 – 300 МГц)
- ✚ Дециметровые (300 МГц – 3 ГГц)
- ✚ Сантиметровые (3 – 30 ГГц)
- ✚ Миллиметровые (30 – 300 ГГц)
- ✚ Оптический диапазон ($3 \cdot 10^{13}$ Å – $3 \cdot 10^{15}$ Å)

Двухпроводные НСС – это воздушные кабельные линии, которые работают в диапазоне сверхдлинных, средних и коротких волн, а также частично захватывают диапазон УКВ. Магнитная совместимость должна выполняться для открытых направляющих систем, к которым относят СК и ВЛС. Они наиболее подвержены электромагнитным влияниям.



1.6 Принципы построения сетей электросвязи

Для обеспечения комплексного использования средств передачи всех видов информации необходимо создать единую сеть трактов и каналов с

возможностью их коммутации в заданном направлении и в требуемом количестве. Эта сеть должна включать:

- ✚ Оконечное устройство (телефонные, факсмодемные аппараты, ПЭВМ).
- ✚ Системы коммутации цепей и окончных устройств, а также каналов и пакетов передаваемой информации.
- ✚ Каналы электросвязи (МСП + среда распространения)

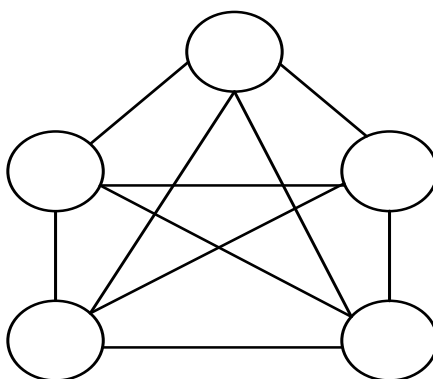
Таким образом, любая сеть электросвязи будет состоять из:

- ✚ Узлов - пунктов коммутации цепей и каналов.
- ✚ Рёбер - линий связи, соединяющие узлы между собой.

Наибольший удельный вес (до 70% и более) в структуре сети электросвязи занимают проводные каналы, требующие наибольших капитальных и эксплуатационных расходов. Это определяет важность задачи по оптимизации структуры сети и экономичности её построения. При этом важным требованием является обеспечение высокой надёжности функционирования сети. Эта задача решается за счёт создания резервных и обходных путей соединения абонентов между собой, а также использования различных типов связи на наиболее важных направлениях. Причём каждый узел связи, обычно имеет 2 или 3 независимых пути установления соединения с другими узлами.

Варианты построения сети электросвязи

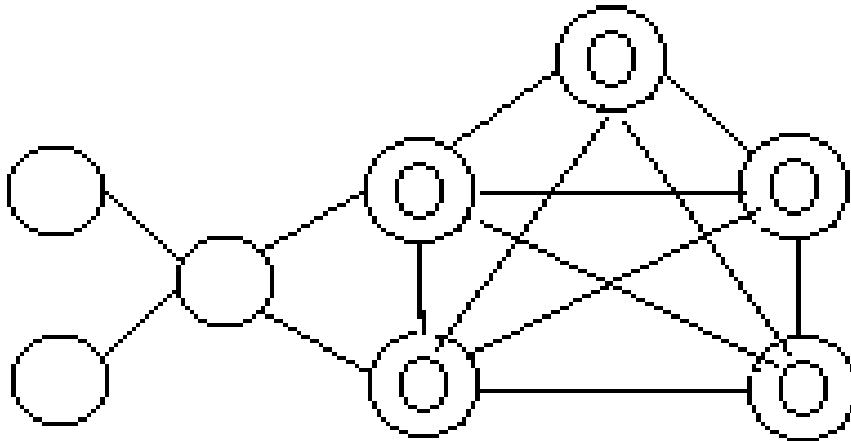
По принципу «каждый узел с каждым» – это полносвязное соединение. В этом случае каждый узел имеет прямое соединение со всеми другими.



Достоинства: самая высокая надёжность за счёт большого числа обходных и резервных путей.

Недостатки: структура сети не выгодна в технико-экономическом отношении.

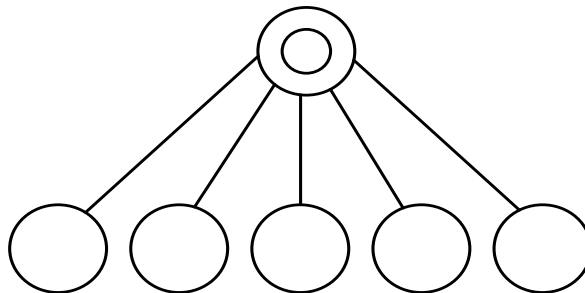
Узловой принцип – несколько узлов, наиболее важных в структуре сети соединяются по принципу «каждый с каждым», менее важные узлы соединяются только с ближайшими (количество кружков – важность узлов).



Достоинства: гибкая структура построения, большая экономичность построения.

Недостатки: уменьшается надёжность функционирования менее важных узлов.

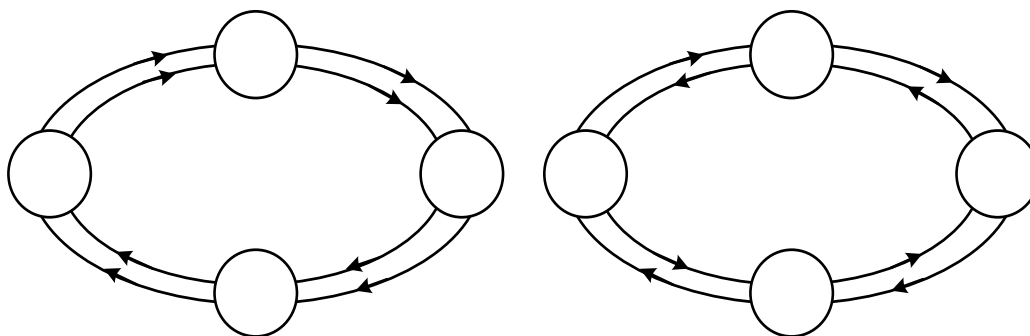
Радиальный принцип – важный узел связан с менее важными одной линией.



Достоинства: самая высокая экономичность.

Недостатки: самая низкая надёжность.

Кольцевая структура.



Достоинства: высокая надёжность за счёт большого количества обходных путей.

Недостатки: при кольцевом построении сети рёбра должны обеспечивать передачу мощных потоков информации с высокой достоверностью и надёжностью, что присуще только волоконно-оптическим кабелям.

Реальные сети электросвязи строятся по комбинированному принципу с использованием всех методов на различных участках сети электросвязи. В основном реализуется радиально-узловой принцип построения сети с жёстким выделением иерархии узлов. В структуре сети выделяется главный узел. Для главного узла выполняются условия построения сети «каждый с каждым».

Структура реальной сети электросвязи

Москва (Главный узел)



Блилежащие области, края, республики соединяются непосредственно между собой; удалённые транзитом соединяются через главный узел.

(Междугородная магистральная сеть связи)



В пределах областей, краёв и республик выделяются зоны единой семизначной нумерации. Каждой зоне присваивается свой трехзначный код. Ёмкость телефонных номеров в пределах зоны 10^7 абонентов. Поэтому зоной может быть отдельный крупный город. Каждый районный центр соединяется с

областным по принципу «каждый с каждым». Районные центры соединяются друг с другом напрямую или транзитом через областной центр.

(Внутриобластная, зональная сеть связи)



Районные центры или города, крупные населенные пункты. Отдельные населённые пункты, находящиеся на территории района могут соединяться по радиальному принципу с районным центром и соответствующим узлом.

В настоящее время в связи с широким внедрением ВОЛП, обладающих большой пропускной способностью, все шире находит применение на всех элементах сети электросвязи кольцевой принцип построения сети с использованием современных цифровых систем передачи. Используется принцип так называемой «наложенной сети», когда вновь строящаяся кольцевая структура дополняет и развивает существующую сеть и в дальнейшем полностью её заменяет. В настоящее время существуют цифровые кольца такой сети для городов, районов и областей, создаётся структура единого цифрового кольца в пределах страны, на этапе создания глобальное цифровое кольцо, соединяющее все страны мира на базе ВОЛП.

При построении сети электросвязи соблюдается производственно-территориальный принцип административно-технического управления сетью. Координируют работу средств электросвязи министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ.

Магистральную междугороднюю связь обслуживает крупнейший оператор связи - ПАО «Ростелеком» через свои филиалы.

Дальнюю связь в настоящее время организуют и ведомственные сети, в частности, сети электросвязи РЖД. Сети общего пользования и ведомственные сети объединяются в пределах единой сети РФ (ЕСЭ РФ) и развиваются на базе единой технической политики.

В связи с внедрением кольцевых структур при построении сети электросвязи принята новая терминология названия сетей. Все сети, объединяющие узлы в кольцевую структуру, получили название транспортных сетей. Сети, обеспечивающие подключение абонентов к узлам транспортной сети, получили название «сети доступа». Поэтому в настоящее время можно считать, что транспортные сети включают в себя магистральную, междугороднюю и зональную сеть. Местная сеть входит в состав сети абонентского доступа.

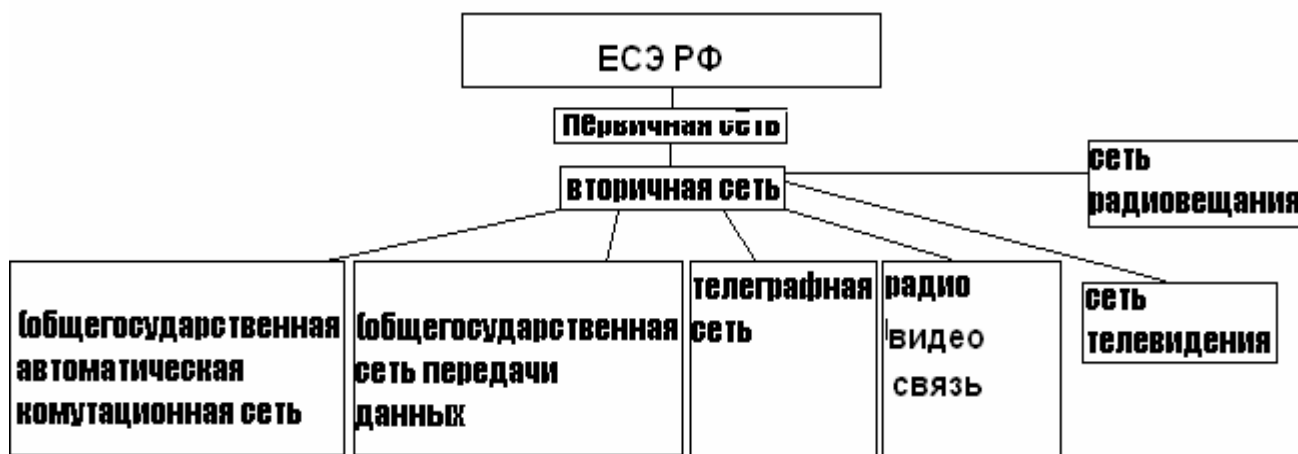
1.7 Первичная и вторичная сети:

Вся сеть электросвязи делится на первичную и вторичную сети.

Первичная сеть представляет собой совокупность всех каналов электросвязи без их подразделения по видам связи. Она состоит из направляющих систем

электросвязи, образующих линейные сооружения связи, а так же многоканальных систем передачи. Первичная сеть едина для всех потребителей и является основой для вторичной сети.

Вторичная сеть состоит из каналов электросвязи одного назначения(телефон, телеграф) и строится на базе первичной сети. Она включает в себя кроме каналов электросвязи ещё и коммутационные узлы определенного назначения (АМТС) а также оконечные устройства, размещённые непосредственно у абонентов, при этом вторичные сети подключаются к первичной сети с помощью соединительных линий. При этом организуется наиболее экономичное и надёжное функционирование отдельных элементов сети электросвязи. Высокая надёжность обеспечивается за счёт резервирования и сочетания различных направляющих сред. Таким образом, структура взаимоувязанной сети электросвязи будет иметь вид:



Лекция №2

Конструкции и характеристики направляющих систем электросвязи

2.1. Общие положения

На сетях связи страны широкое применение находят электрические и оптические направляющие системы связи. Проводными направляющими системами связи являются кабели связи.

В настоящее время в России новые магистральные, внутризоновые и межстанционные линии ГТС Министерства связи и массовых коммуникаций строятся в основном с применением оптических кабелей (ОК).

Электрические кабели, проложенные ранее, продолжают эксплуатироваться. На абонентских сетях эти кабели находят еще достаточно широкое применение.

В связи с более широким применением на сетях связи волоконно-оптических кабелей в настоящей главе более подробно рассмотрены их конструкции. Конструкции электрических кабелей освещены менее подробно.

2.2 Электрические кабели связи

2.2.1 Классификация электрических кабелей связи

Кабель связи представляет собой совокупность изолированных проводников (жил), скрученных по определенной системе и заключенных в общую влагонепроницаемую оболочку (рис. 2.1).

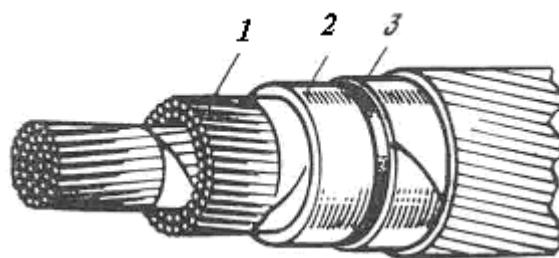


Рис. 2.1. Общий вид электрического кабеля: 1 — сердечник; 2 — оболочка; 3 — броневой покров

Электрические кабели связи классифицируются по следующему ряду признаков:

- область применения выделяют *магистральные* кабели связи, кабели *внутризоновой (внутриобластной)* связи, кабели *сельской* связи, *городские телефонные кабели*, кабели для *соединительных линий и вставок*; кабели *структурированных кабельных систем (СКС)*, *сетей ШПД*, *цифровых абонентских линий*.

- условия прокладки и эксплуатации – кабели *подземные*, *подводные* и *воздушные* (или кабели *воздушной подвески*);

- конструкция – в зависимости от взаимного расположения проводников физической цепи – *симметричные* и *коаксиальные*. Симметричная цепь состоит из двух одинаковых в конструктивном и электрическом отношении проводников (рис. 2.2, а). Коаксиальная цепь представляет собой два цилиндра с совмещенной осью, причем один цилиндр – сплошной проводник – концентрически расположен внутри другого цилиндра, полого (рис. 2.2, б);

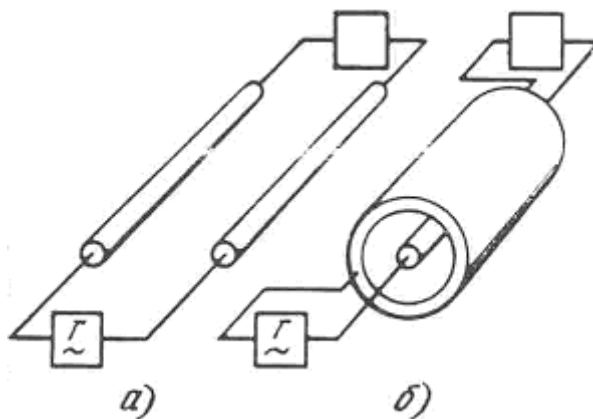


Рис. 2.2. Кабельные цепи: а — симметричная; б — коаксиальная

- спектр передаваемых частот – кабели низкочастотные (до 10 кГц) и высокочастотные (свыше 10 кГц);

- вид скрутки изолированных проводников в группы – кабели парной скрутки и кабели четверочной (звездной) скрутки, кабели повивной и пучковой скрутки;

- род защитного покрова – кабели с металлическими, пластмассовыми и металлопластмассовыми оболочками. Броневого покров кабелей выполняется из стальных лент (для подземной прокладки), из круглых стальных проволок (для защиты от растягивающих усилий).

2.2.2 Конструктивные элементы симметричных кабелей связи

Токопроводящие жилы. Проводники или токопроводящие жилы должны удовлетворять следующим основным требованиям: обладать высокой электрической проводимостью, большой гибкостью и достаточной механической прочностью.

Наибольшее применение при производстве кабелей связи получила медь. Для кабельных жил применяется в основном мягкая проволока марки ММ с

удельным сопротивлением $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Для симметричных

высокочастотных кабелей наибольшее применение находят медные жилы диаметром 0,9; 1,05; 1,2 мм. В кабелях городских телефонных сетей наибольшее распространение получили медные жилы диаметром 0,32; 0,4; 0,5; 0,7 мм.

Изоляция токопроводящих жил. В электрическом отношении свойства изоляционных материалов определяются следующими характеристиками:

- электрической прочностью U_{np} , при которой происходит пробой изоляции;

- удельным электрическим сопротивлением при постоянном токе ρ , характеризующим величину тока утечки диэлектрика;

- диэлектрической проницаемостью ε , характеризующей степень смещения зарядов (поляризации) в диэлектрике при воздействии на него электрического поля;

- тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta$, характеризующим потери энергии в диэлектрике.

Материалы, служащие для изолирования кабельных жил, должны иметь высокое удельное объемное сопротивление, малые диэлектрические потери, низкое значение диэлектрической проницаемости, обладать эластичностью. Кроме того, они должны легко поддаваться технологической обработке, быть стойкими к старению.

По электроизоляционным характеристикам желательно, чтобы изоляция приближалась к свойствам воздуха ($tg\delta = 0$, $\varepsilon = 1$, $\rho = \infty$), который является практически идеальным диэлектриком. В кабелях связи в качестве изоляции применяют комбинированный диэлектрик, состоящий из воздуха и твердого материала, что позволяет выполнять условие симметрии цепей.

Наибольшее применение в качестве изоляционного материала в кабелях связи получили кабельная бумага, полистирол, полиэтилен и другие полимеризационные пластмассы. В таблице 2.1 представлены основные характеристики кабельных диэлектриков.

Таблица 2.1. Основные характеристики кабельных диэлектриков

Диэлектрик	Плотность, г/см ³	ϵ	U , кВ/мм	$tg\delta \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 МГц
Кабельная бумага	0,7	2...2,5	5	400
Полистирол	1,05	2,5...2,7	40	2
Полиэтилен сплошной	0,92	2,2...2,3	30	3
Полиэтилен пористый	0,47	1,45...1,50	6...10	5
Поливинилхлорид	1,26...1,40	3...6	30	400

Наиболее широкое применение в симметричных кабелях связи получили следующие типы изоляции:

- трубчатая, выполняется в виде бумажной ленты, наложенной в виде трубки (рис. 2.3, а), бывает и бумажно-пористая изоляция, представляющая собой однородный слой бумаги;
- кордельная, состоит из корделя, расположенного спирально на проводнике, и ленты, которая накладывается поверх корделя (рис.2.3,б);
- сплошная, выполняется из сплошного слоя пластмассы (рис.2.3,в);
- пористая, выполняется из сплошного слоя пенопласта (рис.2.3,г);
- баллонная, представляет собой тонкостенную пластмассовую трубку, внутри которой свободно располагается проводник, трубка периодически по спирали обжимается и надежно удерживает жилу в центре изоляции (рис. 2.3,д, е).

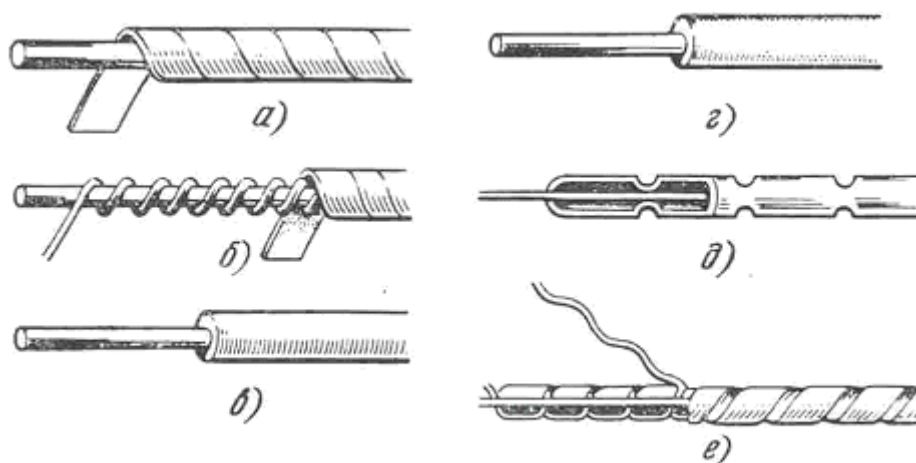


Рис. 2.3. Типы изоляции симметричных кабелей связи

В последние годы получила широкое распространение трехслойная пленко-пористая полиэтиленовая изоляция. На рис. 2.4 показано поперечное сечение изолированной жилы. Изоляция жилы состоит из трех concentрических слоев полиэтилена низкой плотности. Наружный 1 и внутренний 2 слои представляют сплошное пленочное покрытие. Между ними расположен основной промежуточный слой 3, имеющий вспененную (пористую) структуру.

Изоляция окрашена в четыре цвета: красный, зеленый, желтый и синий. Пигмент введен в наружное пленочное покрытие. Пленко-пористая изоляция, наложенная на медную жилу, отличается повышенной геометрической и диэлектрической однородностью благодаря автоматическому регулированию диаметра, погонной емкости и эксцентриситета изолированной жилы.

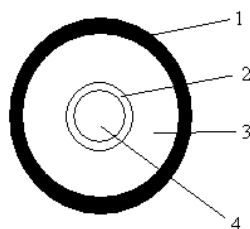


Рис. 2.4. Трехслойная пленко-пористая полиэтиленовая изоляция

Образование групп. Отдельные изолированные жилы скручиваются в группы, называемые элементами симметричного кабеля. В результате жилы цепи становятся в одинаковые условия по отношению друг к другу, в связи с чем снижаются электромагнитные связи между цепями и повышается защищенность их от взаимных и внешних помех.

Существует несколько способов скрутки жил в группы:

- скрутка парная «П» (рис. 2.5, а);
- скрутка звездная «З» (рис. 2.5, б);
- скрутка двойная парная «ДП» (рис. 2.5, в);
- скрутка двойная звездная «ДЗ» (рис. 2.5, г).

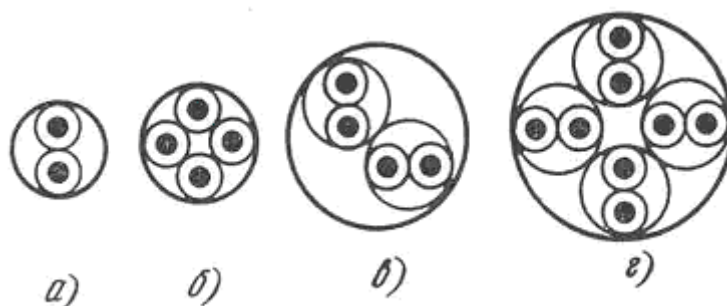


Рис. 2.5. Типы скрутки жил

Наиболее экономичной, обеспечивающей лучшую стабильность по электрическим параметрам, является звездная скрутка. Эта скрутка получила преимущественное применение в высокочастотных симметричных кабелях

связи. Парная скрутка является наиболее простой в производстве и применяется в основном при изготовлении городских телефонных кабелей.

Скрутки «ДП» и «ДЗ» не получили широкого применения в существующих конструкциях симметричных кабелей связи из-за увеличения количества операций скрутки.

Построение кабельного сердечника. Скрученные в группы изолированные жилы систематизируют по определенному закону и объединяют в общий кабельный сердечник.

Различают две разновидности кабельной скрутки:

- однородную, отличительным признаком которой является одинаковая структура и одинаковый диаметр всех образующих сердечник элементарных групп (рис. 2.6,*а*);

- неоднородную, при которой сердечник кабеля образован из групп, разнородных по структуре и имеющих неодинаковый диаметр (рис. 2.6,*б*).

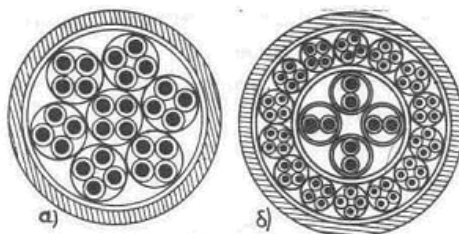


Рис. 2.6. Однородная (*а*) и неоднородная (*б*) скрутки в сердечнике

Наибольшее распространение получила однородная скрутка. В зависимости от характера образования сердечника различают повивную и пучковую системы скрутки.

При пучковой скрутке группы сначала скручиваются в пучки, содержащие по несколько десятков групп (наиболее распространены пучки из 50 и 100 групп), после чего пучки, скручиваясь вместе, образуют сердечник кабеля (рис. 2.7). Пучковая скрутка в основном применяется для кабелей городских телефонных сетей.

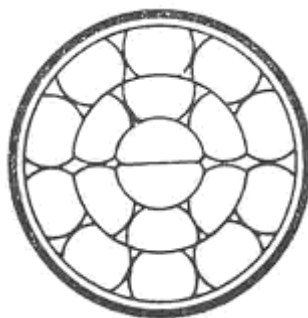


Рис. 2.7. Пучковая система скрутки групп кабельных жил в сердечнике

В сердечнике повивной скрутки группы располагаются последовательными концентрическими повивами, накладываемыми один на другой поверх центрального. При этом смежные повивы должны иметь взаимно противоположные направления скрутки. Для облегчения разделки кабеля при его монтаже каждый повив сердечника обматывается по открытой спирали хлопчатобумажной или капроновой пряжей. В каждом повиве есть

контрольные группы, расцветка которых резко отличается от расцветки всех остальных групп, расположенных в данном повиве.

В настоящее время для скрутки городских телефонных кабелей в кабельной промышленности в основном применяется так называемая *разнонаправленная или SZ скрутка* (название скрутки соответствует условному графическому обозначению левой S и правой Z скруток).

В отличие от классической скрутки, когда кабельные цепи скручиваются по всей длине в одном направлении, в разнонаправленной скрутке направление скрутки периодически меняется и каждый последующий участок кабеля скручивается в сторону, противоположную той, в которую был скручен предыдущий участок. Основным достоинством SZ скрутки является возможность отказаться от вращения в пространстве отдающих и приемных устройств. Это позволяет в один технологический процесс объединить несколько технологических операций, например, скрутку жил в пары, скрутку пар в пучки, наложение изолирующих покровов и тем самым повысить производительность труда.

Защитные оболочки и покровы. Сердечник кабеля покрывают поясной изоляцией и заключают в герметичную оболочку, предохраняющую изоляцию жил от влаги и защищающую кабель от механических воздействий, которые могут возникнуть в процессе транспортировки, прокладки и эксплуатации кабеля. Влагозащитные кабельные оболочки в зависимости от материала, используемого для их изготовления, разделяются на три основные группы: металлические, пластмассовые и металлопластмассовые.

К металлическим оболочкам относятся главным образом свинцовые, алюминиевые и стальные. Свинцовые оболочки накладываются на сердечник методом опрессовки 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 весьма прогрессивные, т.к. 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. Применяются также полиэтиленовые оболочки, не поддерживающие горение.

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

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 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, которые сильно подвержены коррозии, применяются усиленные защитные покровы из вязкого подклеивающего битумного слоя и полиэтиленового шланга.

2.2.3. Конструктивные элементы коаксиальных кабелей связи

Основным элементом коаксиального кабеля является коаксиальная пара – гибкая металлическая трубка, внутри которой в центре находится изолированный проводник.

Трубку принято называть внешним проводником, а центральный провод – внутренним. Коаксиальные кабели различают в зависимости от диаметров внутреннего d и внешнего D проводников и их соотношения d/D . Наибольшее распространение имеют следующие основные типы коаксиальных пар: малые 1,2/4,6; средние 2,6/9,4 и большие 5/18 (в числителе указан диаметр внутреннего проводника, а в знаменателе – внутренний диаметр внешнего проводника в мм).

Внешний проводник может быть образован из медных или алюминиевых лент с продольным швом или оплетки. Наибольшее распространение в кабелях среднего и малого типа получил внешний проводник из медной ленты с продольным швом в виде гофра или молнии.

Кабели среднего типа 2,6/9,4 находят применение в основном на магистральных линиях, кабели малого типа 1,2/4,6 называются малогабаритными и используются в основном на внутризоновых сетях связи. Кабели большого типа 5/18 используются на подводных кабельных линиях.

В коаксиальных парах используются следующие основные типы изоляции:

- шайбовая, состоящая из полиэтиленовых шайб толщиной 2,2 мм, расположенных через 20 – 30 мм (рис. 2.8);



Рис. 2.8. Шайбовая изоляция коаксиальной пары

- баллонно-кордельные или баллонные, аналогичные изоляции жил симметричных кабелей (рис. 2.3, *д, е*).

Кроме своего основного назначения, изоляция коаксиальной пары фиксирует строгую концентричность, т.е. соосность проводников, что является одними из основных требований к коаксиальным конструкциям.

Коаксиальный кабель может состоять из одной или нескольких коаксиальных пар, скрученных в общий сердечник. При этом в комбинированные кабели могут входить коаксиальные пары разного диаметра, а также НЧ и ВЧ симметричные четвертки и пары. На скрученный сердечник накладывается поясная изоляция из нескольких бумажных или пластмассовых лент. Защитные оболочки и покровы коаксиальных кабелей обычно имеют такую же конструкцию, как и симметричные кабели.

2.2.4 Маркировка электрических кабелей связи для магистральных, внутризональных и городских линий

Для удобства классификации и пользования кабелям присваивается определенное условное обозначение – марка.

Под маркой кабеля понимается система условных обозначений, отражающих при помощи букв и цифр основные классификационные признаки и конструктивные особенности кабеля.

Первые одна или две буквы определяют назначение кабеля. Например, городские телефонные кабели обозначаются буквой Т, магистральные симметричные и малогабаритные коаксиальные буквами МК, магистральные коаксиальные – буквами КМ.

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

Последние одна или две буквы марки кабеля обозначают род защитного покрова. Например, голый оцинкованный кабель обозначается буквой Г, алюминиевая оболочка обозначается буквой А, стальная оболочка буквой С или Ст. 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 буквы: л – слой поливинилхлоридных или других пластмассовых лент; 2л – два слоя лент, между которыми наложены битум и крепированная бумага; п – полиэтиленовый шланг; в – поливинилхлоридный шланг. При наличии таких наружных покровов буквы Шп обозначают полиэтиленовый шланг или Шв – поливинилхлоридный шланг. В конце марки кабеля указывают число жил или коаксиальных пар и диаметр жил. Например, четырехчетверочный кабель с

жилами диаметром 1,2 мм имеет следующее обозначение: 4х4х1,2, пятисотпарный городской кабель с жилами диаметром 0,4 мм имеет цифровое обозначение: 500х2х0,4.

Ввиду разнообразия типов выпускаемых промышленностью кабелей одинаковые буквы в маркировке иногда имеют разные обозначения. Например, буквой З обозначаются звездная скрутка в низкочастотных кабелях, а также кабели зонной связи, буквой С – «связь», «стирофлекс», «сталь» и т.п.

Поэтому при необходимости значения букв в каждом отдельном случае можно уточнить по ГОСТ или техническим условиям на кабели.

На сетях электросвязи применение нашли следующие основные типы симметричных кабелей связи (часть из них показана на рис. 2.9):

- МКС, МКСА – кабели с кордельно-полистирольной изоляцией в свинцовой и алюминиевой оболочках;
- МКП – с баллонной полиэтиленовой изоляцией (специальные кабели для железнодорожного транспорта);
- ТЗ, ТЗП – низкочастотные кабели с кордельно-бумажной и пористой полиэтиленовой изоляцией;
- ЗКП, ЗКВ, ЗКА – одночетверочные кабели с полиэтиленовой изоляцией жил в полиэтиленовой, поливинилхлоридной, алюминиевой оболочках;
- КСПП – одночетверочные кабели сельской связи с полиэтиленовой изоляцией жил;
- КСППЗ – одночетверочные кабели сельской телефонной связи (СТС) с полиэтиленовой изоляцией с гидрофобным наполнением (буква З), которое препятствует распространению по кабелю влаги.

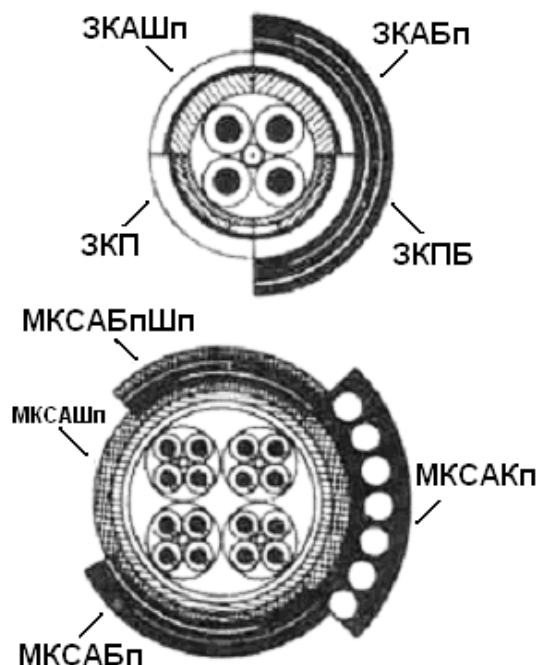


Рис. 2.9. Типы симметричных кабелей связи

Из коаксиальных кабелей распространение получили следующие марки:

- КМБ-4 (КМГ-4, КМК-4) – однородный коаксиальный кабель с четырьмя коаксиальными парами (рис. 2.10);

- КМБ-8/6 (КМГ-8/6, КМК-8/6) – комбинированный коаксиальный кабель, содержит 8 стандартизированных пар 2,6/9,4 и 6 малогабаритных пар 1,2/4,6 мм.

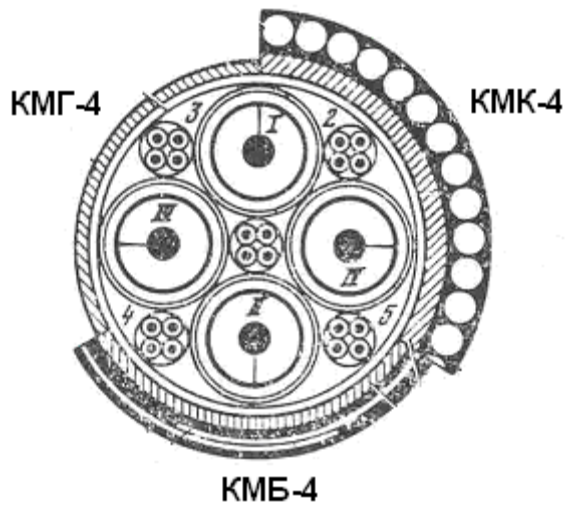


Рис. 2.10. Коаксиальный кабель КМ-4 (Г, Б, К)

На рисунке 2.11 показан малогабаритный коаксиальный кабель с парами 1,2/4,6.

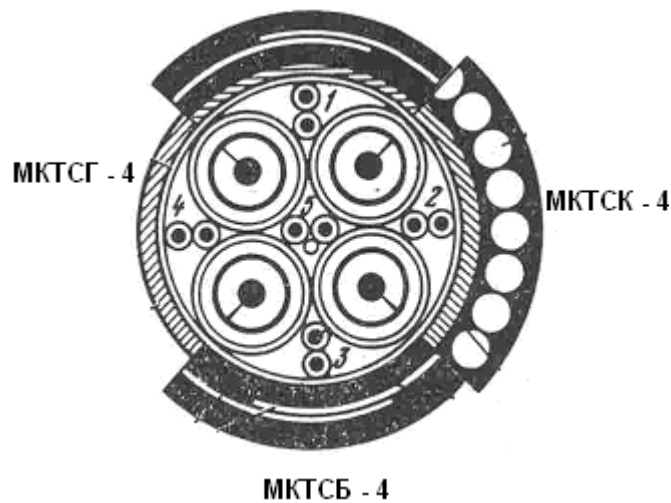


Рис. 2.11. Малогабаритный коаксиальный кабель МКТ-4

На городских телефонных сетях применяются кабели с бумажной изоляцией жил марки ТГ (ТБ) – в свинцовой оболочке, а также кабели с полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой оболочкой марок ТПП и ТППЭп.

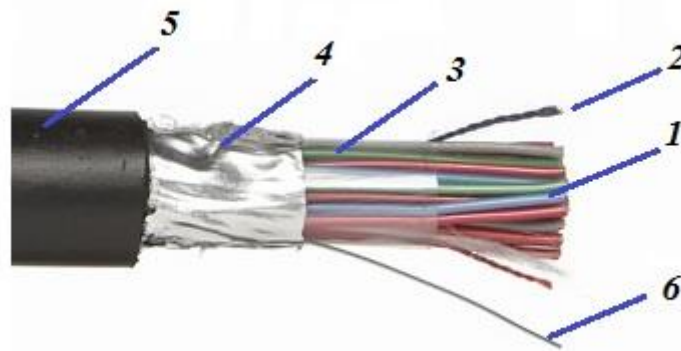


Рис. 2.12. Кабель марки ТППЭп: 1 – жилы в сплошной полиэтиленовой изоляции; 2 – скрепляющая обмотка пучков жил (капроновая нить); 3 – поясная изоляция из полиэтилентерефталатной пленки; 4 – экран из алюминиевой фольги; 5 – оболочка из полиэтилена; 6 – дренажный провод

2.2.5 Электрические кабели для цифровых абонентских линий

Бурное развитие современных сетей связи и непрерывное появление новых услуг в области связи способствуют тому, что все большее число абонентов телефонной и пользователей компьютерной сетей требуют недорого высокоскоростного доступа к различным локальным и ведомственным сетям. Сегодня операторы корпоративных и ведомственных сетей для предоставления абонентам информационных услуг широко внедряют оборудование на основе технологии xDSL (цифровая абонентская линия). Это позволяет увеличить скорость передачи информации по обычным медным витым парам до 8 Мбит/с и более на достаточно большие расстояния.

Использование для этих целей обычного кабеля типа ТППЭп не позволяет добиться 100% решения задач, так как не все пары в кабеле отвечают требованиям современных систем передачи, в первую очередь по параметрам взаимных влияний.

Кабельной промышленностью в последние годы разработаны и выпускаются цифровые телефонные кабели. Эти кабели предназначены для широкополосного абонентского доступа с применением технологий xDSL (цифровые системы передачи с использованием линейных кодов: НДВ-3; 2В1Q; CAP; ТС-РАМ; ДМТ). Кабели могут прокладываться в грунт, в телефонной канализации, по стенам здания и подвешиваться на опорах воздушных линий. Кабели выпускаются емкостью от одной до 100 пар с диаметром медных жил 0,5 мм, 0,64 мм и 0,9 мм. В кабелях может использоваться сплошная полиэтиленовая изоляция или трехслойная пленко-пористо-пленочная.

Для защиты от влаги в кабельный сердечник вводится гидрофобный наполнитель или водоблокирующие сухие элементы. Экранируется кабель алюмополиэтиленовой лентой, в качестве защитных покровов, в зависимости от заказа, могут применяться спирально наложенная стальная лента, продольная гофрированная стальная лента или оплетка стальными проволоками.

Эти кабели имеют повышенную геометрическую однородность и малые шаги скрутки (10-15 мм), что обеспечивает высокую помехозащищенность

цепей от внешних и взаимных электромагнитных влияний. Практически эти кабели изготавливаются по технологии производства LAN кабелей (кабели для локальных сетей с витыми парами).

Примерами таких кабелей являются кабели марок КЦППЭп, КЦППЭпЗ(БбШп), КЦПВ. На рис. 2.12 показана конструкция телефонного высокочастотного кабеля КЦППЭп для сетей широкополосного абонентского доступа (ШПД), оборудованных системами цифрового абонентского уплотнения xDSL при скорости передачи до 100 Мбит/с. Кабель предназначен для прокладки в телефонной канализации, в коллекторах шахт, по стенам зданий и подвески на воздушных линиях связи для организации сети абонентского доступа.



а)

Рис. 2.13. Примеры конструкций кабелей для цифрового абонентского доступа: а – КЦППЭп; б – КЦППЭп-5: 1 - медная токопроводящая жила в сплошной полиэтиленовой изоляции; 2 – поясная изоляция (полиэтилентерефталатная пленка или вспененная полипропиленовая лента); 3 – экран (алюмополиэтиленовая лента); 4 – оболочка (полиэтилен); 5 – дренажный провод (медная луженая проволока).

2.2.6. Электрические кабели для сетей ШПД и СКС

На сетях ШПД, а также СКС на сегодняшний день в основном применяются электрические кабели на основе витых пар (реже звездной скрутки), хотя для построения сетей Ethernet возможно также применение «толстого» коаксиального кабеля с диаметром внутреннего проводника примерно равным 1 см.

Витые пары состоят из изолированных медных жил, скрученных вместе и заключенных в защитную оболочку. Скручивание жил обеспечивает хорошую гибкость кабеля и позволяет уменьшить взаимные влияния между парами.

Кабели на основе витой пары могут быть в экранированном и неэкранированном исполнении. Экранированный симметричный кабель потенциально обладает лучшими электрическими характеристиками по сравнению с неэкранированным. Но при этом кабельные линии на его основе являются очень критичными к качеству выполнения монтажа и заземления, а сами кабели имеют большую стоимость [1].

Кабели СКС имеют следующие особенности:

- для снижения взаимных влияний между отдельными парами кабеля, разные пары скручиваются с различным шагом, шаг скрутки отдельных пар при этом специальным образом согласуют [4];

- в состав конструкции кабелей с экраном из фольги обычно вводится дополнительный тонкий неизолированный медный луженый или оцинкованный дренажный проводник, который необходим для обеспечения электрической непрерывности экрана при случайных разрывах экранирующей пленки во время прокладки и эксплуатации;

- диаметр проводников в кабелях измеряется в американских калибрах, AWG (American Wire Gauge), при этом, чем больше цифра калибра, тем тоньше проводник;

Общих правил в обозначениях конструкций таких кабелей до последнего времени не существовало. Каждый производитель использовал удобную ему маркировку. В связи с этим, в международном стандарте ISO/IEC 11801:2002(E) в информативном специальном приложении E предложено выполнять маркировку конструкций симметричных кабелей в виде, показанном на рис. 2.13 [2]. Предложенная маркировка носит характер рекомендаций и не является пока обязательной.

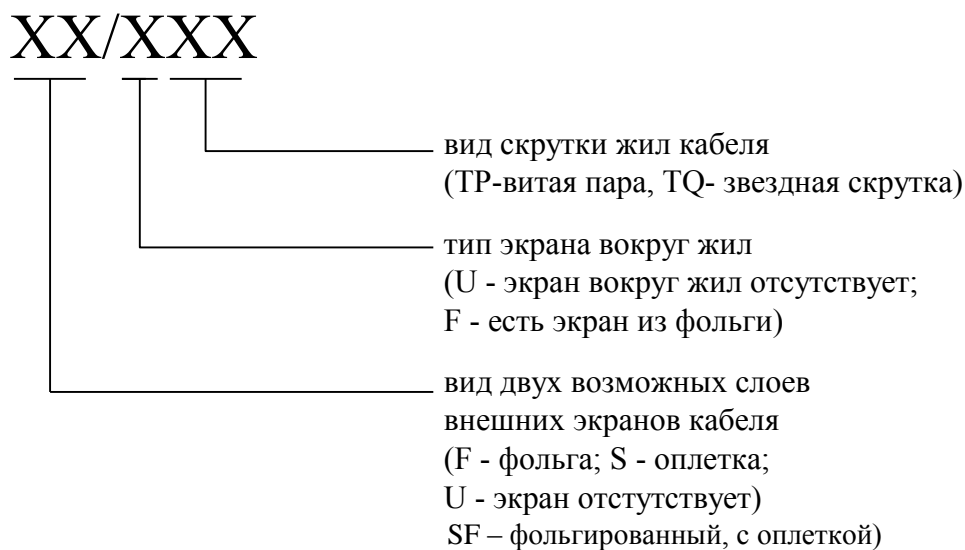
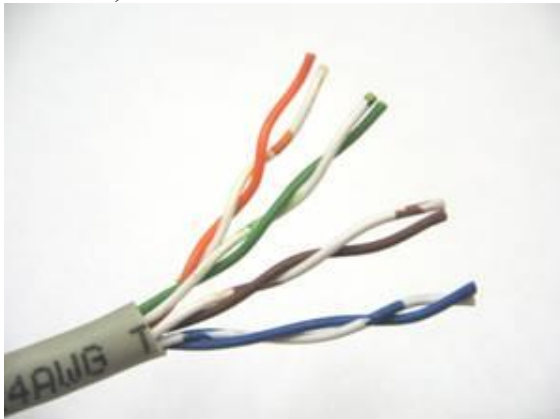


Рис. 2.13. Маркировка для кабелей СКС, рекомендованная в ISO/IEC 11801:2002(E)

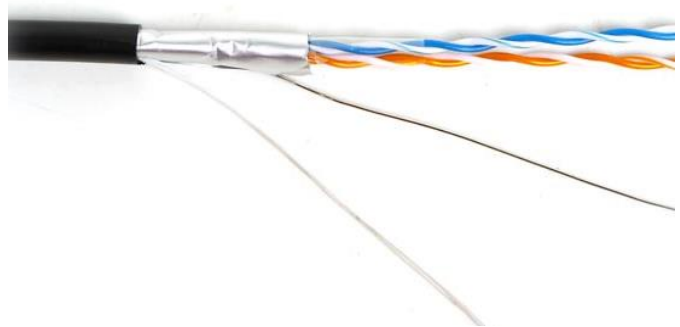
Наиболее часто встречаются следующие обозначения кабелей:

1. U/UTP или UTP (Unshielded twisted pair – неэкранированная витая пара) – кабель не имеет защитного экрана (рис. 2.12, а);
2. F/UTP или FTP (Foiled twisted pair - фольгированная витая пара) – кабель имеет один общий внешний экран из фольги (рис. 2.12, б);
3. U/FTP – кабель имеет экран для каждой пары, но не имеет общего экрана (рис. 2.12, в);
4. S/FTP (Screened Foiled twisted pair – фольгированная экранированная витая пара) – кабель имеет фольгированную защиту каждой пары и внешний экран из оплетки (рис. 2.12, г).

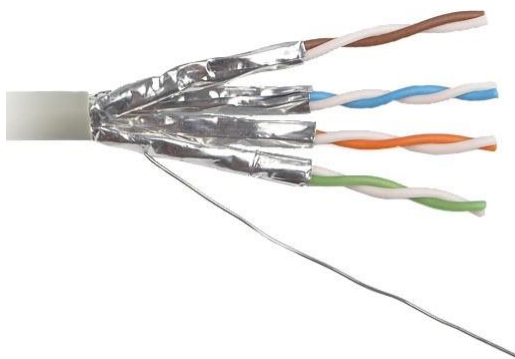
5. SF/UTP (Screened Foiled Unshielded twisted pair) – кабель имеет двойной внешний экран, сделанный из медной оплётки, а также фольги (рис. 2.12, д).



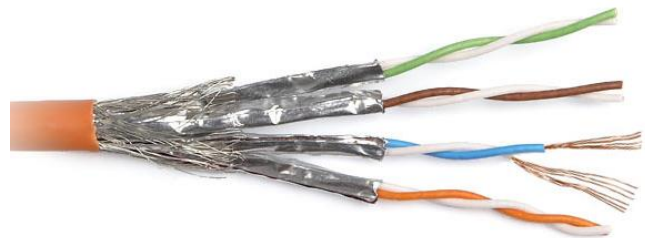
а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 2.14. Витая пара: а – UTP; б – FTP; в – U/FTP; г – S/FTP; д – SF/UTP

Стандартом ISO/IEC 11801 все виды приложений, которые могут обмениваться данными по витым парам, подразделяются на классы: А, В, С, D, Е, F. Для приложений каждого класса определяется соответствующий класс линии связи, который задает предельные электрические характеристики линии, необходимые для нормальной работы приложений соответствующего и более низкого класса [1]. Разным классам соответствует разная ширина полосы пропускаемых частот [2]:

- класс А — 0,1 МГц;
- класс В — 1,0 МГц;

- класс C — 16,0 МГц;
- класс D — 100,0 МГц;
- класс E — 250,0 МГц;
- класс F — 600,0 МГц.

Непосредственно компоненты, из которых создается СКС (кабели, коннекторы, вилки, гнезда и т. п.) классифицируются в стандарте ISO/IEC 11801:2002(E) по категориям. Критерием отнесения компонента к категории является также ширина полосы пропускаемых им частот. В табл. 2.2 приведены категории кабелей СКС.

Табл. 2.2. Категории кабелей СКС

Категория кабеля	Полоса частот до, МГц	Скорость передачи данных до, Мбит/сек.	Назначение и конструкция
CAT1	0,1	–	Передача речевого сигнала, телефонная «лапша» ТРП
CAT2	1	4	2 пары проводников, сейчас не применяется
CAT3	16	10	4 парный кабель для телефонных и локальных сетей протяженностью до 100 метров
CAT4	20	16	4 парный кабель, сейчас не применяется
CAT5	100	100 при использовании 2 пар, 1000 при использовании 4 пар	4 парный кабель для телефонных и локальных сетей
CAT5e	125	100 при использовании 2 пар	UTP 4 парный кабель для компьютерных сетей
CAT6	250	1 000 при использовании 4 пар, 10 000 на расстоянии до 50 метров	UTP 4 парный кабель для компьютерных сетей
CAT6a	500	10 000 на расстоянии до 100 метров	UTP 4 парный кабель высокоскоростных линий Интернет, в перспективе
CAT7	600	10 000 на расстоянии до 100 метров	S/FTP 4 парный кабель высокоскоростных линий Интернет
CAT7a	1200	40 000, 100 000	Разработан для передачи данных на скоростях до 40 Гбит/с на

			расстояние до 50 м и до 100 Гбит/с на расстояние до 15 м
--	--	--	--

В настоящее время для проектирования и строительства СКС применяются кабели не ниже пятой категории.

2.3 Оптические кабели связи

2.3.1. Классификация оптических кабелей связи

Оптические кабели связи (ОК), в отличие от электрических кабелей, нет необходимости классифицировать по принципу их принадлежности на магистральные, внутризонавые, городские и сельские. Объясняется это тем, что в современных ОК, в не зависимости от их принадлежности к тем или иным сетям, используются одинаковые оптические волокна, в большинстве случаев – одномодовое ОВ.

В связи с этим ОК классифицируются по назначению на две основные группы [4]:

- ОК наружной прокладки (др. название - линейные, т.е. для прокладки вне зданий и сооружений);
- ОК внутренней прокладки (др. название внутриобъектовые, т.е. для прокладки внутри зданий и сооружений);

Определяющим фактором применения линейных ОК на сетях связи являются условия их прокладки и эксплуатации. Линейные оптические кабели позволяют создавать сети во всех средах: на суше, в воде и воздухе. С учетом этого линейные ОК можно классифицировать на три группы: подземные; подвесные; подводные. Внутриобъектовые ОК по условиям применения можно классифицировать на две группы: распределительные; станционные (монтажные).

Условия прокладки и эксплуатации ОК в одной и той же среде далеко не одинаковы, поэтому целесообразно классифицировать ОК и по вариантам их применения.

Классификация оптических кабелей по назначению, условиям и вариантам применения представлена на рис. 2.16. [5].

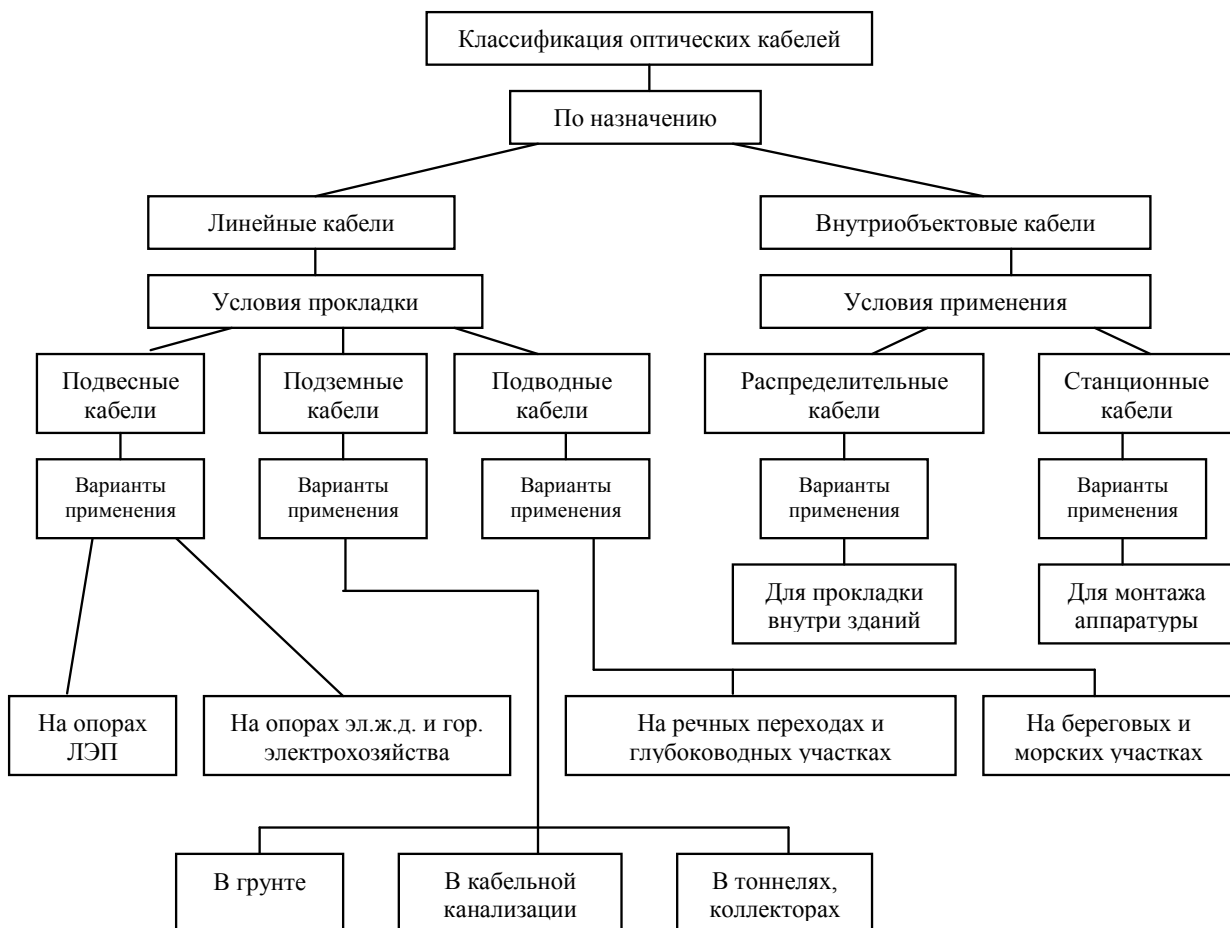


Рис. 2.16. Классификация оптических кабелей

Здесь представлена обобщенная классификация ОК. Более подробно классификация по конструкциям и условиям работы для подземных, подвесных, подводных ОК изложена в [6 - 8].

2.3.2 Основные конструктивные элементы ОК и материалы для их изготовления

ОК – это сложная опто-физическая система, в которой наиболее уязвимым элементом является кварцевое ОВ. Специфичность ОВ заключается не только в распространении по нему оптического излучения, но в критичности его к механическим нагрузкам (растяжение, сдавливание, изгибы, скручивание, удары), чувствительности к перепадам температуры, химическим воздействиям, влиянию влаги и водорода. Основные воздействующие факторы, которым должны противостоять ОК различного назначения и различных условий прокладки по данным [4], приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Основные факторы, воздействующие на оптический кабель

Условия применения	Механические факторы	Климатические факторы	Электромагнитные факторы
1	2	3	4
Подземные	Растягивающие и раздавливающие нагрузки: средние – в легких грунтах, в	Циклическая смена температур в диапазоне рабочих температур.	Импульсный ток молнии. Индуцированно

	тоннелях, коллекторах; значительные – в остальных грунтах; очень значительные – в вечномерзлых грунтах; меньше средних – в кабельной канализации. Изгибы, кручения, удары, вибрация. Воздействие грызунов.	Повышенная относительная влажность. Пониженное атмосферное давление. Плесневые грибы. Влага и вода. Химическое воздействие.	е напряжение от источников высокого напряжения.
--	---	---	--

1	2	3	4
Подвесные	Растягивающие и раздавливающие нагрузки: средние – при подвеске на опорах эл.ж.д и низковольтных ЛЭП, опорах городского электрохозяйства; значительные – при подвеске на опорах высоковольтных ЛЭП. Вибрация. Пляска проводов. Ветер.	Циклическая смена температур в более значительном диапазоне рабочих температур. Атмосферные осадки (дождь, снег, иней). Воздействие прямого солнечного излучения. Соляной туман. Химическое воздействие.	Импульсный ток молнии. Термическое воздействие тока молнии.
Подводные	Растягивающие и раздавливающие нагрузки – очень значительные. Высокое избыточное гидростатическое давление.	Прямое длительное воздействие воды. Циклическая смена температур в диапазоне рабочих температур (меньше, чем для подземных).	-
Распределительные и станционные	Растягивающие и раздавливающие нагрузки: близкие к средним для распределительных; очень незначительные для станционных. Изгибы и удары.	Прямое воздействие огня при пожарах. Циклическая смена температур в диапазоне рабочих температур (меньше, чем для подземных).	-

Приведенные в таблице 2.4 воздействующие факторы и определяют особенности конструкций ОК различного назначения и использования в них конструктивных элементов, обеспечивающих прокладку и эксплуатацию ОК в заданных интервалах воздействия внешних факторов.

Основные конструктивные элементы ОК: оптическое волокно; центральный силовой элемент (ЦСЭ); модули (модульные трубки); заполняющие кордели (при необходимости); профилированные сердечники; скрепляющие нити и ленты; гидрофобные материалы; периферийные силовые элементы и бронепокровы; оболочки ОК (внешняя, внутренняя). Отдельные

перечисленные элементы могут отсутствовать исходя из назначения и условий применения ОК.

Оптическое волокно – это основной конструктивный элемент ОК, выполняющий роль направляющей среды передачи.

Центральный силовой элемент (ЦСЭ) – придает ОК дополнительную устойчивость к механическим нагрузкам, принимает на себя нагрузку при прокладке ОК, обеспечивает большую гибкость кабеля. В качестве центрального силового элемента ОК повивной скрутки используют стеклопластиковый стержень, а также стальную проволоку или трос с полимерным покрытием. Для изготовления ОК, предназначенных для прокладки в грунт, в качестве центрального силового элемента преимущественно используются стеклопластиковый стержень, с целью повышения стойкости ОК к внешним электромагнитным воздействиям.

Модуль (модульная трубка) – самостоятельный конструктивный элемент ОК, содержащий одно и более ОВ, выполняет функции защитного элемента, уменьшает опасность обрыва ОВ и обеспечивает стабильность его работы при воздействии продольных и поперечных сил. Представляет собой полую трубку, выполненную из полибутелентерефталата (ПБТ), поликарбоната, полиамида.

В модулях кабелей наружной прокладки, применяемых на сетях связи России, содержится, как правило: 4, 6, 8 или 12 ОВ, уложенных свободно. При этом пучок волокон укладывается в модуле по спирали, с определенным шагом скрутки (рис. 2.17). Таким образом, длина ОВ несколько больше длины модуля. Свободное пространство в модуле, не занятое волокнами, заполнено гидрофобным гелем, который также обладает и тиксотропными свойствами.

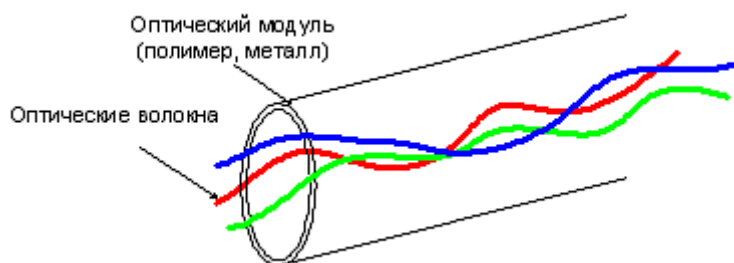


Рис. 2.17. Укладка ОВ в модуле

Оптический сердечник формируется из одного центрального модуля (рис. 2.18), либо из нескольких модулей (рис. 2.19, а), скрученных вокруг центрального силового элемента (ЦСЭ), принимающего на себя механические нагрузки при прокладке ОК. Оптический сердечник повышает механическую прочность ОК, защищает ОВ от изгибов и от нагрузок на растяжение и сдавливание, в пределах, не оказывающих влияния на передаточные параметры. Оптические сердечники могут содержать дополнительные элементы: элементы заполнения (заполняющие кордели), медные жилы, пары или четвертки из медных жил.

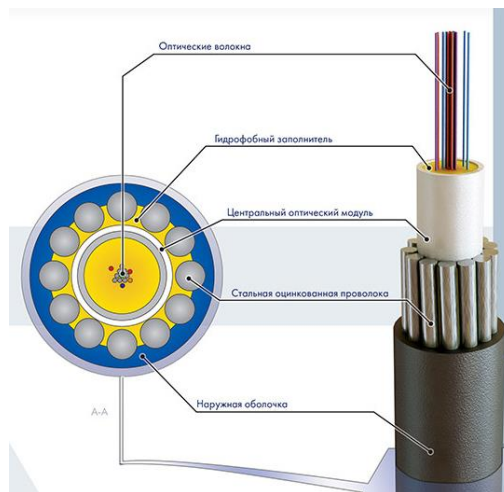


Рис. 2.18. Пример ОК с центральной модульной трубкой

Обычно повив оптического сердечника скрепляется *нитьями или скрепляющей лентой*. Конструкция оптического сердечника определяется функциональным назначением и условиями применения ОК.

Заполняющие кордели – это сплошные ПЭ стержни для устойчивости конструкции ОК.

Оптические кабели, сердечник которого представляет собой повив модулей называют кабелями *модульной конструкции* (рис. 2.19, а).

Вместо модулей в некоторых конструкциях кабелей применяется *профилированный сердечник*, выполненный из полимера (рис. 2.19, б). В пазы сердечника может укладываться по спирали одно ОВ или пучок ОВ (аналогично укладке в модульных трубках), модули с ОВ или же лента ОВ. Свободное пространство в пазах такого сердечника также заполняется гидрофобным гелем. В центре профилированного сердечника расположен силовой элемент, который обеспечивает необходимые механические параметры и стойкость к температурным изменениям. Следует отметить, что в России ОК с профилированным сердечником встречаются редко, в основном применяются кабели модульной конструкции.

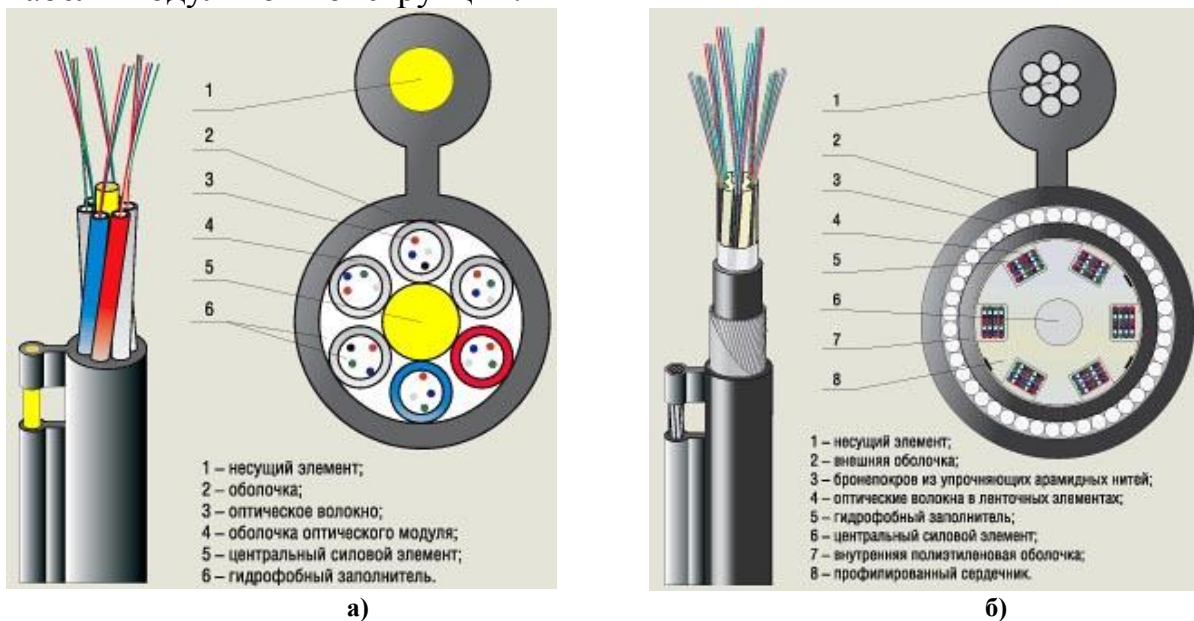


Рис. 2.19. Примеры конструкций ОК: а – модульная конструкция; б – с профилированным сердечником

Отдельно следует сказать об оптических кабелях ленточной конструкции (рис. 2.20). В таких кабелях оптические волокна от двух и более размещаются в линейный ряд, образуя линейный элемент. Фиксация ОВ в линейном элементе может осуществляться с помощью полимерного материала по длине элемента, выполняющего функцию вторичного защитного покрытия (рис. 2.20, а), или адгезивного слоя и наложенных поверх синтетических лент (рис.2.20, б).

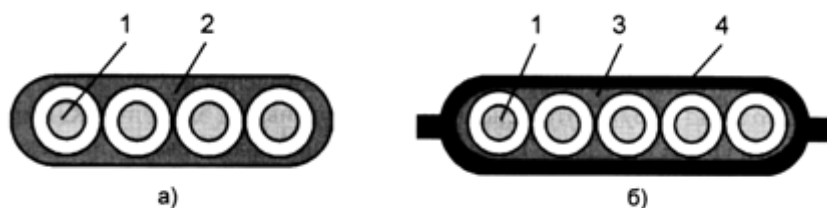
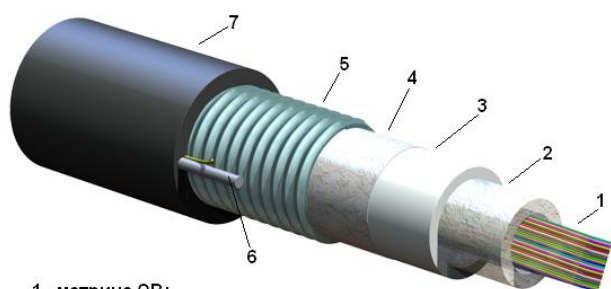
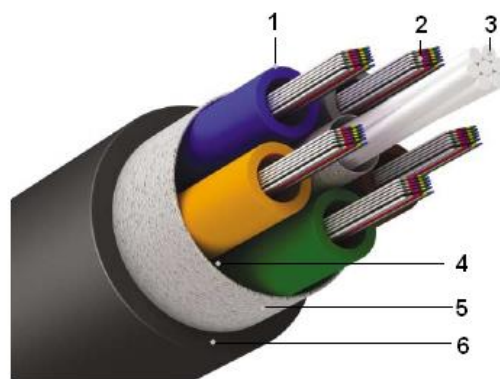


Рис. 2.20. Примеры конструкций ленточного оптического модуля: а) с полимерным защитным материалом; б) с дополнительным защитным покрытием из адгезивного слоя и синтетических лент: 1 – ОВ в защитном покрытии; 2 – полимерный материал; 3 – адгезивный слой; 4 – синтетическая лента

Из линейных элементов (лент) может создаваться матрица (единичный блок) с определенным числом ОВ, который затем размещается либо в центральной модульной трубке из полимера (рис. 2.21, а), либо в нескольких модульных трубках (2.21, б), либо в пазах спиралеобразного профилированного сердечника (рис. 2.19, б).



- 1 - матрица ОВ;
- 2 - водоблокирующая трубка;
- 3 - центральная модульная трубка;
- 4 - водоблокирующая лента;
- 5 - стальная гофрированная трубка;
- 6 - силовой элемент (стальной стержень);
- 7 - внешняя ПЭ оболочка.



- 1 - модуль, заполненный гидрофобным гелем;
- 2 - матрица с ОВ;
- 3 - ЦСЭ (стеклопластиковые стержни или стальной трос);
- 4 - водоблокирующая лента;
- 5 - внешняя ПЭ оболочка.

а)

б)

Рис. 2.21. Примеры ОК ленточных конструкций: а – с центральным модулем; б – с повивом модулей.

Различают оптические кабели с волокном со свободной укладкой и в буферном покрытии (рис. 2.22). ОК с волокном со свободной укладкой - это кабели модульной конструкции, рассмотренные выше (рис. 2.18, 2.19 а), в которых ОВ свободно уложено в модульной трубке. Такие кабели обычно применяются для наружной прокладки.

Кабели с волокнами в плотном буферном покрытии, как правило, применяются для прокладки внутри зданий. Плотный буферный слой увеличивает сопротивляемость ОВ к сжатию и изгибам. Но при этом, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) буферного покрытия и ОВ - различны. При понижении температуры окружающей среды буферное покрытие сжимается сильнее, чем ОВ и это может приводить к увеличению затухания ОВ. Общеизвестно, что кабели наружной прокладки испытывают температурные воздействия в большем диапазоне, чем кабели, прокладываемые в здании. Поэтому, ОК с волокнами в буферном покрытии часто используются в качестве распределительных ОК, например, в сетях FTTH PON, т.е. там, где на них не будет воздействия значительных отрицательных температур.

Гидрофобные заполнители. В качестве гидрофобных заполнителей, защищающих ОК от распространения влаги, преимущественно применяют гидрофобные гелеобразные компаунды (гидрофобные гели). Гидрофобным гелем заполняется свободное пространство как в модулях с ОВ, так и межмодульное пространство в оптическом сердечнике кабеля.

Однако в некоторых конструкциях ОК вместо гидрофобного геля в сердечнике ОК могут применяться водоблокирующие нити и ленты. Такие конструкции называют ОК с «сухим» сердечником (рис. 2.23). Водоблокирующие нити и ленты выполняются на основе порошкообразных материалов (в основном, на основе распушенной целлюлозы, разбухающей при контакте с водой и образующей «пробку» для дальнейшего ее распространения). Достоинством подобных конструкций ОК является сокращение времени разделки кабеля при монтаже. При разделке ОК водоблокирующие ленты и нити просто срезаются, в то время как очистка модулей от гидрофоба производится с применением специальной жидкости (например D-Gel) и занимает намного больше времени, поскольку требуется тщательная протирка каждого модуля. Тем не менее, конструкции ОК с «сухим» сердечником применяются намного реже, чем ОК с гидрофобом.



Рис. 2.23. Пример оптических кабелей с «сухой» конструкцией сердечника

Гидрофобные гели, используемые в модулях, помимо задачи защиты ОВ от воздействия влаги выполняют также функцию амортизатора для ОВ при механических воздействиях на ОК, и функцию смазки, уменьшающей трение между ОВ и стенкой оптического модуля.

Гидрофобные гели, применяемые для заполнения модулей и гидрофобные гели, применяемые для заполнения сердечника ОК, несколько отличаются по характеристикам (диапазоном рабочих температур, вязкость и т.д.). Внутримодульные наполнители характеризуются значительно более высоким предъявляемыми к ним требованиями и имеют меньшую вязкость по сравнению с межмодульными наполнителями.

Основным материалом для скрепления элементов сердечника ОК повивной скрутки является *полиэтилентерефталатная лента*, обеспечивающая фиксацию элементов конструкции сердечника до наложения полимерной оболочки и предотвращающая вытекание из сердечника гидрофобного геля.

Лекция №3

Основы электродинамики направляющих систем электросвязи

3.1 Исходные положения электродинамики. Основные характеристики сред распространения электромагнитного поля.

Существуют две основных разновидности объектов материального мира:

- ✚ Вещество
- ✚ Электромагнитное поле.

Объектом изучения электродинамики является электромагнитное поле. Оно проявляет себя силовым воздействием на частицы, обладающие зарядом. Так же, как и вещество, электромагнитное поле обладает массой, энергией и скоростью. Оно характеризуется распределением в окружающем пространстве и обнаруживает дискретность структуры. С целью упрощения исследования единое электромагнитное поле разделяют на две составляющих: электрическое и магнитное поле. Если неподвижные заряды создают только электрическое поле, то движущиеся заряды создают и электрическое и магнитное поля. Если наблюдатель будет двигаться с той же скоростью, что и электрический заряд, то для него будет создаваться только электрическое поле. А для неподвижного наблюдателя будет создаваться и электрическое и магнитное поля, то есть введение данных понятий относительно. Электрические и магнитные свойства любой среды полностью характеризуются тремя параметрами:

Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

Где: $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[\frac{\hat{O}}{\hat{i}} \right]$ – это диэлектрическая проницаемость среды в вакууме.

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды. Это величина безразмерная. Она показывает, во сколько раз абсолютная диэлектрическая проницаемость среды больше, чем диэлектрическая постоянная.

Абсолютная магнитная проницаемость среды:

$$\mu_a = \mu_0 \mu_r$$

Где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\tilde{A}\hat{i}}{\hat{i}} \right]$ – это магнитная проницаемость вакуума, или магнитная постоянная:

μ_r – относительная магнитная проницаемость среды. Она показывает во сколько раз магнитная проницаемость среды больше магнитной постоянной. Для всех цветных металлов и диэлектриков $\mu_a = \mu_0$, $\mu_r = 1$.

Удельная электрическая проводимость:

$$\sigma \left(\frac{\tilde{N}\hat{i}}{\hat{i}} \right), \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\hat{I}\hat{i}}{\hat{i}} \right).$$

Электромагнитное поле в каждый произвольный момент времени в любой

среде полностью характеризуется четырьмя величинами: $\vec{E}, \vec{D}, \vec{B}, \vec{H}$.

✚ \vec{E} - напряженность электрического поля, действующая на неподвижный точечный положительный заряд q .

✚ \vec{D} - вектор электрической индукции, связывающий параметры электромагнитного поля с электрическими свойствами среды. Измеряется в Кл/м².

- ✚ \vec{B} - магнитная индукция. Определяется как сила, с которой действует магнитное поле на единичный положительный точечный заряд, движущийся с единичной скоростью в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля.

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \left[\frac{\hat{A} \acute{a}}{\dot{i}} \right]$$

- ✚ \vec{H} - напряженность электромагнитного поля. Характеризует интенсивность магнитного поля.

Любые материалы по параметрам $\epsilon_a, \mu_a, \sigma$ делятся на *однородные, линейные, изотропные, анизотропные*.

Однородная среда:

Материальная среда является однородной, если в пределах некоторого объема, занимаемого данной средой, параметры $\epsilon_a, \mu_a, \sigma$ не зависят от координаты в пределах данного объема, то есть

$$\epsilon_a = f(x, y, z) \neq f(z, r, \varphi)$$

$$\mu_a = f(x, y, z) \neq f(z, r, \varphi)$$

$$\sigma = f(x, y, z) \neq f(z, r, \varphi)$$

Линейная среда:

Если параметры $\epsilon_a, \mu_a, \sigma$ не зависят от величины приложенного воздействия, то среда линейная, а если зависят, то среда нелинейная.

Изотропная среда:

$\epsilon_a, \mu_a, \sigma$ являются скалярными величинами.

Анизотропная среда:

Среда будет анизотропной, если хотя бы одна из величин $\epsilon_a, \mu_a, \sigma$ – вектор (тензор).

Все реальные среды по электрическим свойствам делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.

- ✚ Для проводников преобладающим током является ток проводимости
- ✚ Для диэлектриков преобладает ток смещения.
- ✚ Для полупроводников выполняется условие сопоставимости токов проводимости и смещения.

Деление материальных сред на проводники, полупроводники и диэлектрики условно и носит относительный характер, так как в значительной степени зависит от скорости изменения электрического поля, то есть от частоты. Частотную зависимость среды можно охарактеризовать произведением $\omega\epsilon_a$. Магнитные свойства среды можно охарактеризовать произведением $\mu\epsilon_a$.

Таким образом, можно охарактеризовать любую среду в зависимости от частоты электромагнитного поля.

В материальных средах существует два вида поля:

- ✚ **Потенциальное поле.** Его силовые линии имеют начало и конец. Они тесно связаны со своим источником, то есть чисто потенциальным полем является электрическое поле, силовые линии которого начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.
- ✚ **Вихревое поле.** Его силовые линии всегда непрерывны. Они не имеют ни начала, ни окончания, и представляют собой замкнутую петлю. Магнитное поле является полностью вихревым.

3.2 Основные уравнения электродинамики в интегральной и дифференциальной форме

Первое уравнение Максвелла:

Линейный интеграл напряжённости магнитного поля по любому замкнутому контуру равен полному току, проходящему через поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\oint \vec{H} dl = I_{np} + I_{см}$$

Второе уравнение Максвелла:

ЭДС контура при изменении магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром, равна скорости изменения этого потока со знаком минус.

$$\oint \vec{E} dl = \frac{d\vec{\Phi}}{dt}, \quad \vec{\Phi} = \mu_a \vec{H} S$$

На практике для НСЭ чаще требуется определять электромагнитное поле не в пределах некоторого контура или объёма, а в конкретной точке пространства.

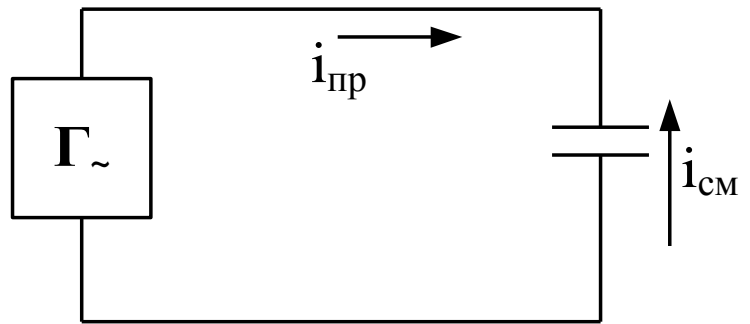
Для этого используют запись уравнений в дифференциальной форме:

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = \sigma \dot{\vec{E}} + i\omega \varepsilon_a \dot{\vec{E}}$$

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = -i\omega \mu_a \dot{\vec{H}}$$

$$\sigma \dot{\vec{E}} = \vec{i}_{i\delta}$$

$$i\omega \varepsilon_a \dot{\vec{E}} = \vec{i}_{\dot{m}}$$

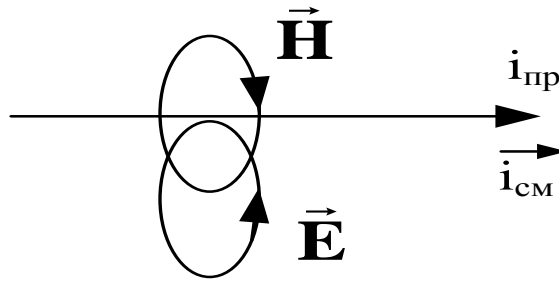


Данная запись предполагает, что электромагнитное поле имеет гармоническую форму или представляется в виде набора гармоник. При этом:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\max} e^{i\omega t}, \quad \frac{d\vec{E}}{dt} = i\omega \vec{E}, \quad \frac{d\vec{H}}{dt} = i\omega \vec{H}.$$

Электрическое поле любой формы может быть представлено в виде набора гармонических составляющих, для которых справедлива данная запись уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Понятие **ротора** значит, что соответствующее поле является вихревым, то есть силовые линии поля действуют по замкнутым контурам. Соответственно для первого уравнения Максвелла можно сказать, что вокруг вектора любого тока образуется вихревое магнитное поле, направление действия которого подчиняется правилу «буравчика».

Второе уравнение Максвелла показывает, что если магнитное поле является переменным, то вокруг вектора напряжённости магнитного поля образуется вихревое электрическое поле, связанное с магнитным. В свою очередь электрическое поле вызывает в пространстве магнитное поле и так далее.



Таким образом, система уравнений Максвелла показывает, что электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде взаимосвязанных магнитных и электрических вихревых полей.

Кроме первого и второго уравнений Максвелла существуют два вспомогательных уравнения:

$div\vec{D} = \rho$, – определяет плотность заряда (измеряется в Кл/м³). Фактически это уравнение есть закон Кулона, который показывает, что силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах, образующих данное поле. То есть силовые линии электрического поля могут иметь начало и окончание

$div\vec{B} = 0$ где второе вспомогательное уравнение есть закон непрерывности силовых линий магнитного поля и показывает, что магнитных зарядов в природе не существует, и силовые линии вихревого магнитного поля не имеют ни начала, ни окончания.

В зависимости от вида среды преобладают токи проводимости или токи смещения, что изменяет запись уравнений Максвелла.

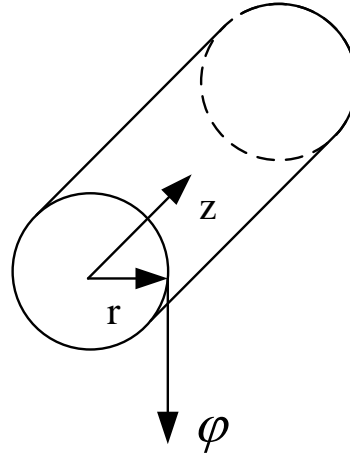
Для **металлических проводников**, где действуют только токи проводимости, система уравнений Максвелла записывается:

$$\begin{cases} rot\vec{H} = \sigma\vec{E}, \\ rot\vec{E} = -i\omega\mu_a\vec{H} \end{cases}$$

Для **диэлектриков**, где действуют только токи смещения, система уравнений Максвелла записывается:

$$\begin{cases} rot\vec{H} = i\omega\epsilon_a\vec{E}, \\ rot\vec{E} = -i\omega\mu_a\vec{H} \end{cases}$$

Для направляющих систем электросвязи принята цилиндрическая система координат (z, r, φ) , причём ось направляющей системы всегда совмещается с координатой z , r – радиус направляющей системы, координата φ – смещение точки по границе раздела двух сред.



Соответственно векторы напряжённости электрического и магнитного полей будут представлены в виде трёх составляющих по соответствующим координатам. Таким образом система из двух основных уравнений максвелла будет представлена в цилиндрической системе координат в виде шести уравнений по соответствующим координатам.

3.3 Система уравнений Максвелла в цилиндрических координатах для проводников:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \frac{dE_z}{d\varphi} = -i\omega\mu_a H_r \\ \frac{dE_z}{dr} = i\omega\mu_a H_\varphi \\ \frac{dH_\varphi}{dr} + \frac{1}{r} H_\varphi - \frac{1}{r} \frac{H_r}{d\varphi} = \sigma E_z \end{array} \right.$$

После дифференцирования H_r по φ и H_φ по r и подстановки полученных значений в исходную систему уравнений можно из трёх дифференциальных уравнений первого порядка получить одно дифференциальное уравнение второго порядка для соответствующей составляющей электрического поля.

Получим волновое уравнение (уравнение ГЕЛЬМГОЛЬЦА):

$$\frac{d^2 E_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE_z}{d\varphi} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 E_z}{d\varphi^2} = ik^2 E_z$$

Где k – волновое число среды, которое определяется выражением:

$$k^2 = \omega^2 \varepsilon_a \mu_a, \text{ причём } \varepsilon_a \text{ может быть комплексным числом.}$$

Если нам необходимо найти составляющую магнитного поля H_z , то запись дифференциального уравнения второго порядка полностью аналогична при замене E_z на H_z . Дифференциальное уравнение второго порядка получило название волнового уравнения. Оно определяет действие составляющих поля по координате z . Действие поля по координате φ можно определить из

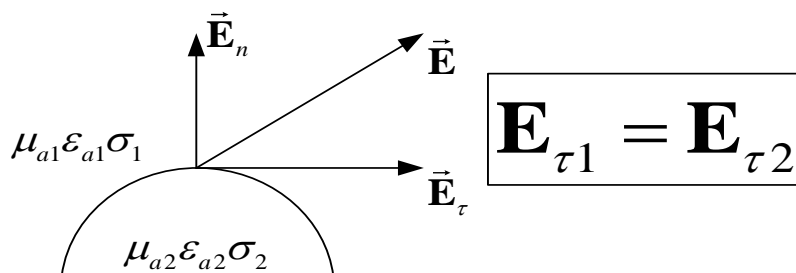
$$\text{исходной системы уравнений: } dH_\varphi = \left(\frac{1}{i\omega\mu_a} \right) \left(\frac{dE_z}{dr} \right)$$

Зная действие составляющих поля в соответствующих точках пространства, мы можем однозначно решить любую электродинамическую задачу.

3.4 Граничные условия для векторов электромагнитного поля.

При решении электродинамических задач в системах электросвязи необходимо располагать сведениями о поведении электромагнитного поля на границе раздела сред. Это граница металл – диэлектрик в электрических кабелях связи или граница диэлектрик – диэлектрик для волоконных световодов. Если параметры на границе раздела сред изменяются скачкообразно, то в общем случае компоненты векторов электрического поля также претерпевают разрыв в точках границы. Состояние электрических полей на границах раздела сред формируются в виде граничных условий. Получение решений электродинамической задачи связано с наложением граничных условий. Рассмотрим действие вектора электромагнитного поля на границе раздела двух сред.

Первое граничное условие:



Таким образом, на границе раздела двух сред тангенциальные составляющие электрического поля равны между собой.

Второе граничное условие:

$$\mathbf{D}_{n1} = \mathbf{D}_{n2}$$

На границе раздела двух сред нормальные составляющие векторов электрической индукции равны между собой.

Соответствующие условия выполняются для \mathbf{H} и \mathbf{B} :

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{\tau 1} = \mathbf{H}_{\tau 2} \\ \mathbf{B}_{n1} = \mathbf{B}_{n2} \end{cases}$$

Можно также доказать, что:

$$\frac{\mathbf{D}_{\tau 1}}{\mathbf{D}_{\tau 2}} = \frac{\varepsilon_{\alpha 1}}{\varepsilon_{\alpha 2}}$$

Если на границе раздела сред существует распределённый заряд ρ_s , то нормальные составляющие векторов электромагнитной индукции испытывают разрыв, равный величине поверхностного заряда:

$$\mathbf{D}_{1n} - \mathbf{D}_{2n} = \rho_s$$

Если на границе раздела сред действует ток с плотностью i_s , то тангенциальные составляющие электромагнитного поля претерпевают разрыв, равный величине поверхностного тока.

$$\mathbf{H}_{1\tau} - \mathbf{H}_{2\tau} = i_s$$

3.5 Баланс мощностей, теорема Умова – Пойнтинга.

Энергия электрического и магнитного поля связаны соотношением:

$$W_{\Sigma} = W_{\dot{Y}} + W_{\dot{I}} = \int_V \left(\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) dV$$

Используя уравнения Максвелла, баланс энергий электрического и магнитного поля в течение некоторого времени в пределах некоторого объёма V , ограниченного поверхностью S , можно представить в виде **уравнения Умова-Пойнтинга**: Левая часть уравнения характеризует расход энергии электромагнитного поля за единицу времени. Правая часть уравнения:

$$-\frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) dV = \int_S [\vec{E}, \vec{H}] dS + \int_V \sigma E^2 dV$$

- ✚ Первое слагаемое представляет собой поток энергии в окружающее пространство через замкнутую поверхность S объёма V за отрезок времени t .
- ✚ Второе слагаемое выражает энергию в соответствии с законом Джоуля-Ленца, которая преобразуется в тепло внутри объёма V за единицу времени.

Таким образом, любое изменение энергии электромагнитного поля связано или с преобразованием этой энергии в тепло, или с излучением её в окружающее пространство. Векторное произведение векторов напряжённости электрического и магнитного полей обозначают через вектор Пойнтинга:

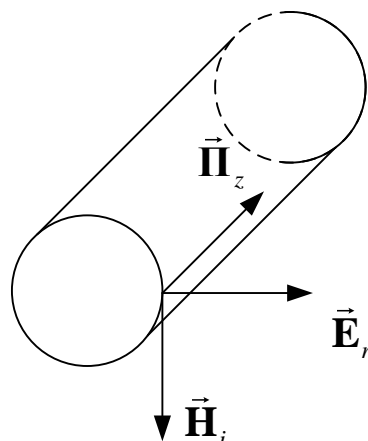
$$[\vec{E} \cdot \vec{H}] = \vec{I}$$

Направление действия вектора Пойнтинга связано с векторами напряжённости электрического и магнитного полей **правилом буравчика**: Если плоскость движения ручки буравчика совместить с плоскостью действия векторов напряжённости электрического и магнитного полей, то вращение ручки буравчика по кратчайшей линии от вектора напряжённости электрического поля к вектору напряжённости магнитного поля по часовой стрелке укажет направление действия вектора Пойнтинга.

Вектор Пойнтинга определяет количество энергии, распространяющейся в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока энергии. Таким образом, излучаемая из объёма энергия или поступающая в объём через ограниченную поверхность энергия согласно теореме Умова-Пойнтинга количественно равна интегралу от скалярного произведения Вектора Пойнтинга на бесконечно малый элемент dS .

$$W = \int_S \vec{I} dS$$

Энергия, которая распространяется вдоль НСЭ, характеризуется составляющими E_r и H_i .



Таким образом, для определения количества энергии, переданной по НСЭ, достаточно знать две составляющих поля E_r и H_i , причём данное соотношение характеризует идеальную цепь, когда вся энергия передаётся по НСЭ без преобразования в тепло. В реальных цепях с потерями, обладающих активным сопротивлением, часть энергии согласно закону Джоуля-Ленца будет теряться, преобразовываясь в тепло. Соответственно **НСЭ, обладающие меньшим сопротивлением, являются более качественными**. С учётом применения для НСЭ цилиндрической системы координат интеграл, характеризующий количество энергии, удобнее записывать в этой системе координат.

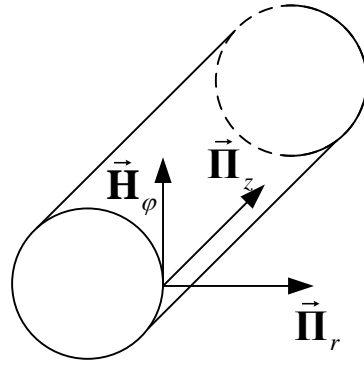
Рассмотрим варианты распространения энергии поля по НСЭ:

$$\vec{P}_z + W_z = \int_0^{2\pi} E_r H_\varphi^* r d\varphi$$

- ✚ Процесс передачи энергии:
- ✚ Процесс излучения энергии:
- ✚ Процесс поглощения энергии:

Согласно закону Джоуля-Ленца:

$$\vec{\Pi}_r + W_r = \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r dr$$



$$W_i = I^2 Z, \quad Z = R + i\omega L$$

$$I^2 Z = \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r d\varphi = R + i\omega L$$

Таким образом, теорема Умова-Пойтинга напрямую выводит на аналитические выражения для параметров передачи цепи R и L.

3.6. Режимы передачи по НСЭ. Классификация электромагнитных волн в НСЭ.

Можно выделить пять режимов передачи по НСЭ:

Статический режим

Статический режим соответствует электро и магнитостатике, когда перемещение зарядов по НСЭ не происходит, цепь разомкнута, а к ней подключен источник постоянного напряжения. Для этого режима НСЭ справедливы следующие уравнения Максвелла:

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = 0 \\ \operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = 0 \end{array} \right\}$$

Данный режим используется для определения ёмкости цепи.

Стационарный режим

Соответствует постоянному току в цепи НСЭ. Для этого режима НСЭ справедливо следующее уравнение Максвелла:

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \\ \operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = 0 \end{array} \right\}$$

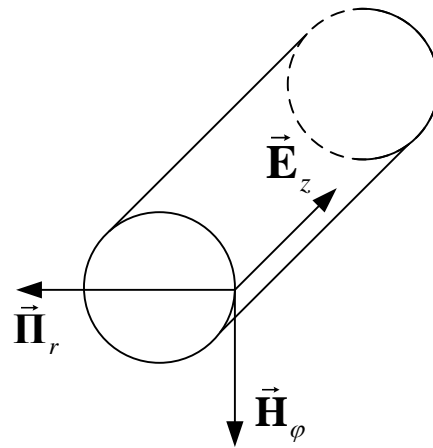
Стационарный режим позволяет определить индуктивность цепи.

Квазистационарный режим.

Соответствует режиму работы всех двухпроводных НСЭ, когда токи проводимости намного больше токов смещения, то есть, он соответствует режиму работы всех двухпроводных НСЭ. $D/\lambda \ll 1$ $f < 10^6 - 10^8$ Гц.

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \\ \operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = -i\omega\mu_a \vec{\mathbf{H}} \end{array} \right\}$$

$$\vec{P}_r + W_r = \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r d\varphi$$



Особенность: Для получения решений достаточно воспользоваться теорией линейных электрических цепей.

В этом режиме распространяются волны типа Т (поперечные волны), которые соответствуют условию, когда вектора напряжённости электрического и магнитного поля действуют в плоскости, перпендикулярной направлению распространения электромагнитной волны. НСЭ: ВЛС, СК, КК.

Электродинамический режим

$$f=10^9-10^{12} \text{ Гц}, D/\lambda=1$$

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \sigma \vec{E} + i\omega \epsilon_a \vec{E} \\ \text{rot} \vec{E} &= -i\omega \mu_a \vec{H} \end{aligned} \right\}$$

НСЭ: ВК, КК, волноводы, ЛПВ. Волны Е и Н.

Квазиоптический

$$D/\lambda \gg 1, f=10^{13}-10^{15} \text{ Гц}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= i\omega \epsilon_a \vec{E} \\ \text{rot} \vec{E} &= -i\omega \mu_a \vec{H} \end{aligned} \right\}$$

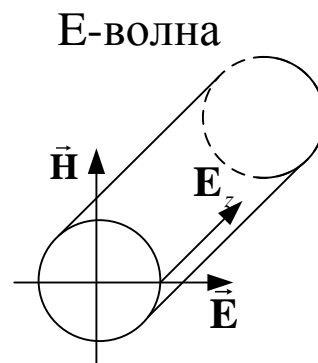
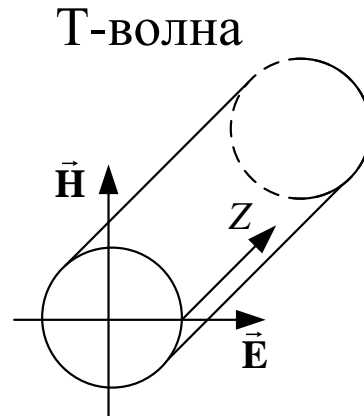
НСЭ: световоды, ОК. Волны HE и EH.

3.7 Классификация электромагнитных волн в НСЭ.

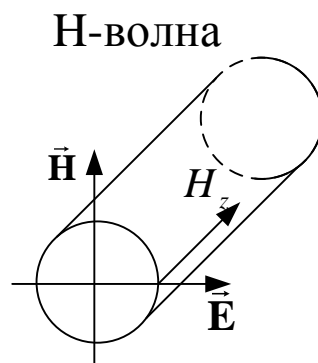
Характер распространения электромагнитного поля в НСЭ зависит прежде всего от класса волны, используемой для передачи электромагнитной энергии.

Различают 4 класса электромагнитных волн:

T-волна. Это поперечно-электромагнитная волна (составляющие электрического и магнитного полей находятся в одной плоскости, перпендикулярной направлению распространения энергии). Эти волны существуют во всех двухпроводных НСЭ. Другие классы волн в них отсутствуют.



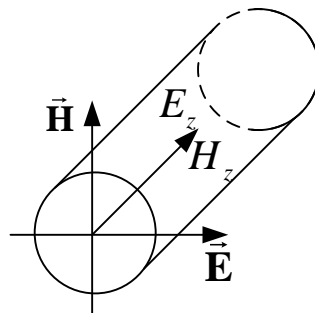
Это электрическая (поперечно-магнитная) волна или ТН волна.



Наряду с поперечными составляющими поля существует продольная составляющая H_z .

Электрические и магнитные поля существуют в НСЭ, у которых ток смещения начинает преобладать над током проводимости (диапазон 10^{10} - 10^{12}).

Гибридные волны H_E и E_H



Вдоль оси Z существуют составляющие электрического и магнитного поля. Гибридные волны соответствуют условию, когда ток смещения намного больше тока проводимости. Такие волны существуют в волоконных световодах, диэлектрических волноводах и оптических линиях связи.

Наряду с делением электромагнитных волн на классы существует их деление на типы.

Тип волны или **мода волны** – это электромагнитный образ волны, характеризующийся числом m и n полей по периметру и диаметру НСЭ.

Тип обозначается числами:

n – m и n по периметру.

m - m и n по диаметру.

Общее обозначение: $H_{E_{nm}}$ или $E_{H_{nm}}$.

Симметричные электромагнитные волны имеют индекс $n=0$. Таким образом при рассмотрении НСЭ необходимо учитывать тип волны, причём одновременно в НСЭ может существовать до нескольких тысяч типов волн.

Теория передачи по проводным направляющим системам электросвязи

4.1 Исходные принципы расчета НСЭ

Уравнения Максвелла позволяют решить любую электродинамическую задачу при условии наложения граничных условий для сред, образующих НСЭ. Однако в большинстве случаев можно упростить решение задачи для ряда НСЭ, применяя законы теории цепей или законы геометрической оптики.

Основными соотношениями, определяющими возможность применения упрощённых методов расчёта НСЭ, является соотношение между передаваемой длиной волны и поперечными размерами НСЭ.

$\lambda \gg a$ – **КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ**. Применяются законы теории цепей (Ома и Кирхгоффа).

λ соизмеримо с a – **ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ**. Применяется решение системы уравнений Максвелла.

$\lambda \ll a$ – **КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ** – это процесс передачи лучей или световых потоков (лучевой процесс). Для получения решений используется уравнение, законы Френеля и другие уравнения геометрической оптики.

Конструкции НСЭ и соответствующие режимы передачи отражены в таблице:

<i>РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ</i>	<i>Частота , Гц</i>	<i>Длина волны</i>	<i>Тип волны</i>	<i>Тип НСЭ</i>
<i>КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ</i>	0 - 10⁹	м, км	T	ВЛС, СК
<i>ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ</i>	10¹⁰ - 10¹²	см, мм	E_{nm} H_{nm}	Волноводы, световоды, ЛПВ
<i>КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ</i>	10¹³ - 10¹⁵	мкм	HE, TH, гибридные волны, симметричные волны, E_{0m}, H_{0m}.	Волноводы, световоды, СК

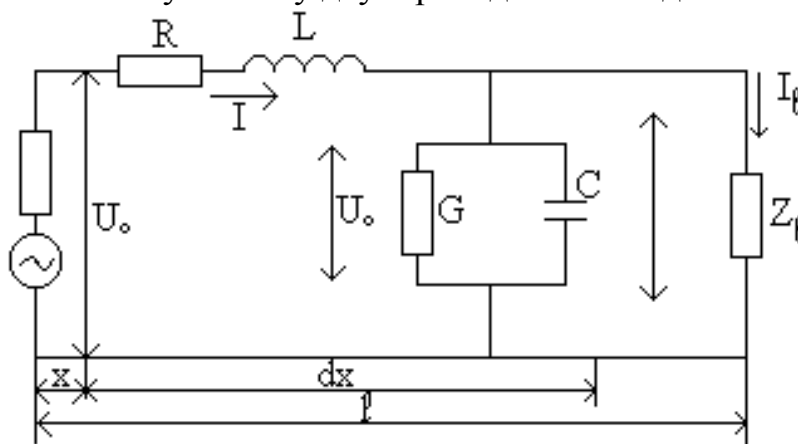
В зависимости от типа НСЭ в дальнейшем будем использовать данные принципы теории расчёта применительно к конкретным условиям. Применим

законы теории цепей для простейшей линии из двух однородных проводников в квазистационарном режиме.

4.2 Уравнение однородной двухпроводной линии

В соответствии с теорией электрических цепей двухпроводная линия представляет собой колебательный контур, состоящий из распределённых по длине линий параметров активного сопротивления R , индуктивности L , ёмкости C и проводимости изоляции G . **Если данные параметры распределены по линии равномерно, то такая линия называется ОДНОРОДНОЙ.** Большинство двухпроводных НСЭ являются однородными, поэтому данные параметры приводят к единицам длины линии: (Ф/км, Ом/км, См/км, Гн/км). **Данные параметры линии называются ПЕРВИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПЕРЕДАЧИ** и полностью определяют процесс передачи электромагнитной энергии по линии. Эквивалентной схемой двухпроводной НСЭ будет схема ФНЧ с распределёнными параметрами.

Рассмотрим эквивалентную схему двухпроводной НСЭ длиной l .



$Z=R+i\omega L$ – продольный параметр

$Y=G+i\omega C$ – поперечный параметр

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

Для решения данной системы возьмём вторые производные по dx от тока и напряжения. В итоге получаем систему второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{d^2U}{dx^2} = \frac{dI}{dx}(R + i\omega L) \\ \frac{d^2I}{dx^2} = \frac{dU}{dx}(G + i\omega C) \end{cases}$$

Подставим в полученную систему уравнений значения dU/dx и dI/dx из исходной системы уравнений. В результате получим:

$\gamma^2 = (R + i\omega L)(G + i\omega C)$ **КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛИНИИ**, с учётом данного обозначения:

$$\begin{cases} \frac{d^2U}{dx^2} = U(R + i\omega L)(G + i\omega C) \\ \frac{d^2I}{dx^2} = I(G + i\omega C)(R + i\omega L) \end{cases}$$

Решение для данной системы будет одинаковым для I и для U .

$$\begin{cases} \frac{d^2U}{dx^2} = \gamma^2 U \\ \frac{d^2I}{dx^2} = \gamma^2 I \end{cases}$$

Решение уравнения для U :

$$U = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}$$

Из этого решения видно, что U в любой точке представляет собой сумму двух волн (волны, падающей от начала к концу линии, и волны, отражённой от конца линии). Подставим U в первую производную:

$$\frac{dU}{dx} = A\gamma e^{\gamma x} - B\gamma e^{-\gamma x} = \gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x})$$

Подставим полученное значение потерь в исходное уравнение системы:

$$-\gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) = I(R + i\omega L)$$

Разделим левую и правую часть на γ :

$$Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x} = \frac{I(R + i\omega L)}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = Z_B,$$

где Z_B – волновое сопротивление

$$-Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} = IZ_B,$$

$$I = \frac{(Be^{-\gamma x} - Ae^{\gamma x})}{Z_B},$$

$$I = \frac{Be^{-\gamma x}}{Z_B} - \frac{Ae^{\gamma x}}{Z_B} = U_{i\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} + U_{i\dot{\delta}\ddot{\delta}}$$

Соотношение между этими волнами будет характеризовать Z_B :

$$\frac{U_{i\dot{\alpha}\ddot{\alpha}}}{I_{i\dot{\alpha}\ddot{\alpha}}} = \frac{U_{i\dot{\delta}\ddot{\delta}}}{I_{i\dot{\delta}\ddot{\delta}}} = Z_B$$

Волновое сопротивление линии одинаково для любой линии (как для падающей, так и для отражённой) и измеряется в Ом. Для нахождения постоянных интегрирования приравняем $x=0$, то есть будем рассматривать начало линии:

$$A = \frac{(U_0 - I_0 Z_B)}{2}, \quad B = \frac{(U_0 + I_0 Z_B)}{2}$$

Подставим постоянные интегрирования в решения уравнений:

$$IZ_B = \frac{(U_0 - I_0 Z_B)e^{-\gamma x}}{2} - \frac{(U_0 - I_0 Z_B)e^{\gamma x}}{2},$$

$$B = \frac{(U_0 + I_0 Z_B)e^{-\gamma x}}{2} - \frac{(U_0 - I_0 Z_B)e^{\gamma x}}{2}$$

Так как $ch\gamma x = \frac{(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})}{2}$ и $sh\gamma x = \frac{(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})}{2}$, то решение можно

записать в виде:

$$\begin{cases} U_x = U_0 \operatorname{ch} \gamma x - I_0 Z_B \operatorname{sh} \gamma x, \\ I_x = I_0 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{U_0}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma x \end{cases}$$

Данное решение справедливо для любой нагрузки. В реальных линиях связи обычно выполняют согласование, как в начале, так и в конце линии, то есть выполняют условие: $Z_0 = Z_B = Z_1$. Для согласования линии выполняется условие отсутствия отражённой волны, то есть вся энергия от генератора, передаваемая по линии, полностью поглощается нагрузкой. Это наиболее оптимальный режим работы линии. Для него решение упрощается и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} U_x = U_0 e^{-\gamma x} \\ I_x = I_0 e^{-\gamma x} \end{cases}$$

При распространении волны тока и напряжения по согласованной линии происходит затухание этих волн пропорционально величине коэффициента распространения и длине линии.

$$\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)} = \alpha + i\beta$$

Где α -коэффициент затухания линии, β -коэффициент фазы линии.

Коэффициент распространения γ и волновое сопротивление Z_B называют вторичными параметрами распространения. Они полностью зависят от первичных параметров и наряду с ними определяют процесс распространения электромагнитной волны по линии. Исходя из основного уравнения однородной линии при условии согласования нагрузок, можно записать:

$$\frac{U_0}{U_\ell} e^{\alpha \ell} = e^{\alpha \ell} e^{\beta \ell} \quad \left| \frac{U_0}{U_\ell} \right| = e^{\alpha \ell} \Rightarrow \ln \left| \frac{U_0}{U_\ell} \right| = \alpha \ell$$

$$a = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_0}{P_\ell} \right|$$

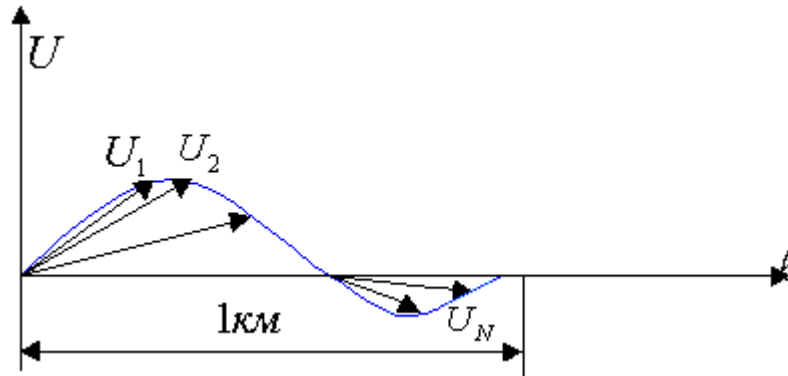
$\alpha \ell$ – затухание линии a

$$1 \text{ Нп} = 8,68 \text{ Дб} \quad 1 \text{ Дб} = 0,115 \text{ Нп}$$

При подстановке формулы первичных параметров с размерностью, соответствующей системе СИ (Ом/км, Ф/км, Гн/км, См/км) затухание

получается в Нп. **Коэффициент фазы β соответствует изменению фазы на длине линии 1км.**

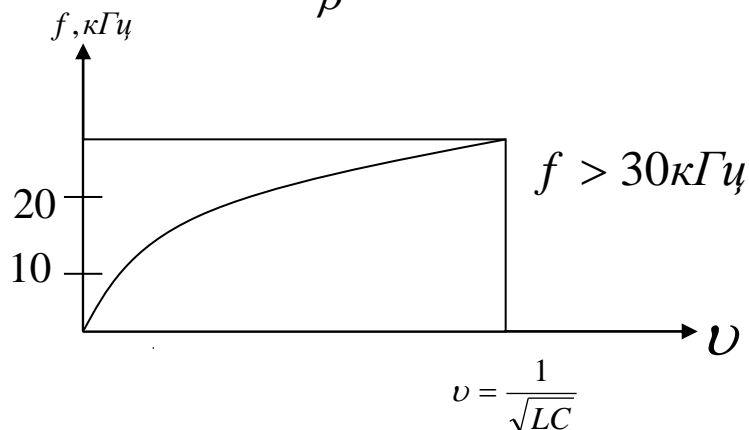
Если рассматривать графически процессы изменения тока и напряжения в линии длиной l , то такое изменение будет соответствовать уменьшению вектора напряжения по величине и фазе при распространении по линии:



a, Дб	0,1	1	2	3	4	5	7	8	9	40	60
P_0/P_i	1,02	1,26	1,58	1,99	2,51	3,16	5,01	6,31	8		10^4	10^6

Со вторичными параметрами непосредственно связана **скорость распространения по линии:**

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad [\text{км/с}]$$



$$v = \frac{1}{\sqrt{LC} \left(\sqrt{\frac{LC}{RC}} + \frac{\sqrt{\frac{LC}{RC}}}{2} \right)}$$

График изменения фазы и частоты

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = |Z_B| e^{i\varphi_{Z_B}}$$

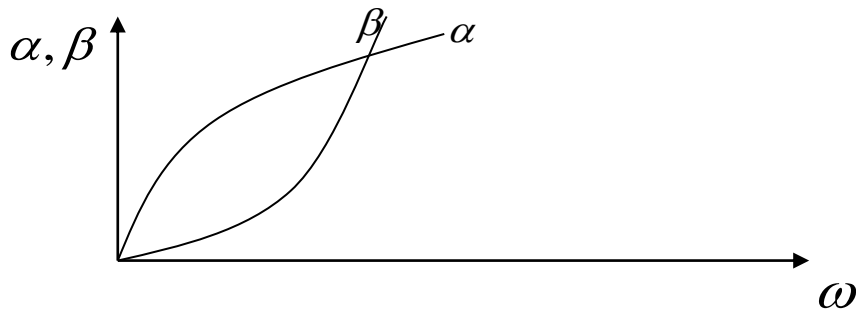
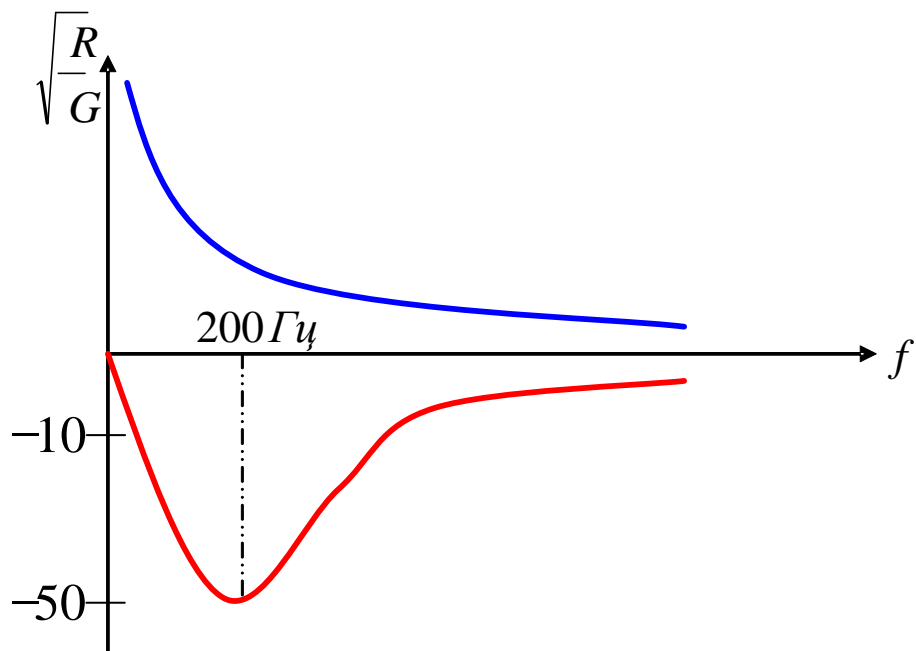


График изменения $|Z_B|$



На частоте $\approx 800 \text{ Гц}$ аргумент достигает максимума. Знак минус у аргумента показывает, что в кабельных цепях преобладает ёмкостная составляющая по сравнению с индуктивной, особенно на низких частотах.

4.3 Процессы в неоднородных линиях

Рассмотренные частотные зависимости и формулы соответствуют однородным согласованным линиям, в которых созданы идеальные условия для передачи электромагнитных сигналов. В реальности встречаются линии, не согласованные по нагрузкам и неоднородные по длине. В таких линиях процесс передачи электромагнитной волны связан не только с собственными потерями в линии, определяемыми собственным затуханием, но и рабочим затуханием линии, связанным с процессом отражения волны от неоднородности.

Величина **РАБОЧЕГО ЗАТУХАНИЯ НЕСОГЛАСОВАННОЙ ЛИНИИ** определяется соотношением:

$$a_P = \overset{\textcircled{1}}{\alpha \ell} + \ln \left| \frac{Z_0 + Z_B}{2\sqrt{Z_0 Z_B}} \right| + \ln \left| \frac{Z_0 + Z_\ell}{2\sqrt{Z_0 Z_\ell}} \right| + \ln \left| 1 - P_1 P_2 e^{-2\gamma \ell} \right| \overset{\textcircled{3}}$$

где Z_0 – нагрузка генератора, Z_ℓ – нагрузка в конце линии

Z_B – нагрузка в начале линии

$\alpha \ell$ – собственное затухание

P_1 - коэффициент отражения в начале линии, P_2 - коэффициент отражения в конце линии.

-1 < P < 1-режим ХХ

1-затухание за счёт несогласованности в начале линии.

2- затухание за счёт несогласованности в конце линии.

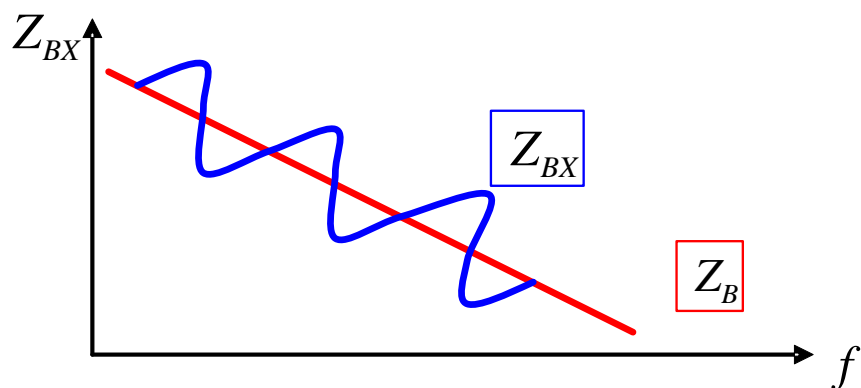
3-затухание за счёт взаимодействия несогласованности в начале и в конце линии.

В общем случае рабочее затухание может оказаться меньше собственного из-за фазовых соотношений и неоднородностей. Однако в большинстве случаев рабочее затухание больше собственного, поэтому дальность связи на несогласованных линиях меньше из-за большего затухания. Для несогласованных линий вместо параметра волнового сопротивления вводят

$$Z_{BX} = \frac{U_0}{I_0} = Z_B \operatorname{th}(\gamma \ell + n) \quad \text{где} \quad n = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{p_2}$$

параметр **ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛИНИИ.**

Количественно:



Такое изменение Z_{BX} затрудняет согласование линии с аппаратурой передачи и приводит к амплитудно-частотным искажениям сигнала. Таким образом, в неоднородных несогласованных линиях не только не уменьшается дальность связи, но и увеличиваются искажения передаваемых сигналов, то есть снижается качество связи. В такой линии действие неоднородностей приводит к появлению двух дополнительных потоков энергии. Это обратный поток энергии, направленный к началу линии и попутный поток, направленный к концу линии вместе с основным потоком, но имеющий другие фазовые составляющие.

Неоднородности в линиях связи подразделяются на **ВНУТРЕННИЕ** и **СТЫКОВЫЕ**. **ВНУТРЕННИЕ** вызываются дефектами в технологии изготовления кабеля и приводят к местным отклонениям волнового сопротивления в линии от номинального значения. Величина внутренних неоднородностей количественно оценивается коэффициентом отражения:

$$P = \frac{Z_B^l - Z_B}{Z_B^l + Z_B} = \frac{\Delta Z_B}{2Z_B}$$

Z_B^l – местное волновое сопротивление в точке неоднородности

ΔZ_B – абсолютное изменение волнового сопротивления от номинала

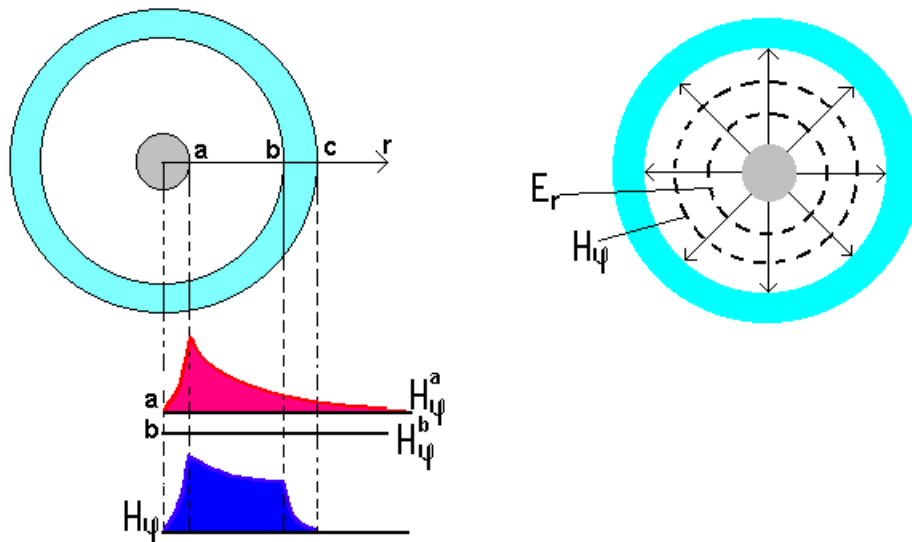
Z_B – номинальное значение сопротивления

Стыковые неоднородности неизбежно возникают при соединении строительных длин кабеля в муфтах, так как невозможно подобрать по параметрам идеальные строительные длины. Наличие внутренних и стыковых неоднородностей, так же, как и несогласованность по нагрузке в начале и в конце линии участвуют в создании обратного и попутного потока энергии, искажающего передаваемый сигнал.

ВЫВОД: В наиболее благоприятном состоянии находятся линии, согласованные по нагрузкам и имеющие минимальные внутренние и стыковые неоднородности.

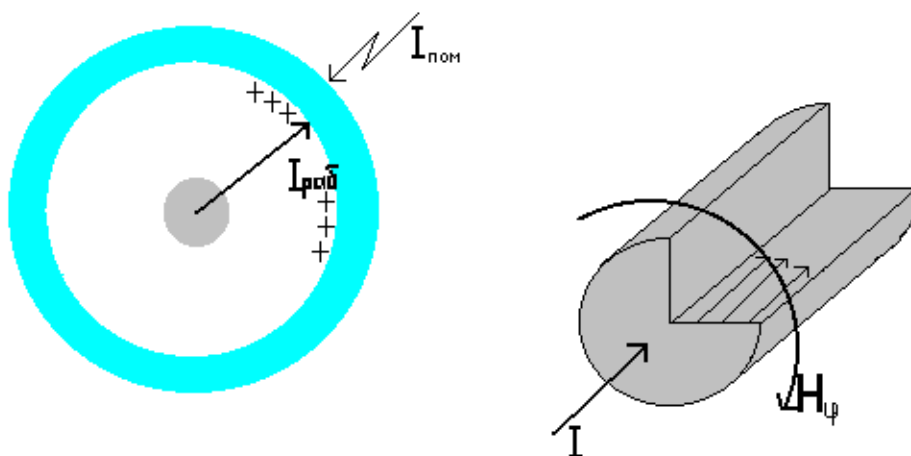
5.1 Электрические процессы в коаксиальных цепях

Конструктивные особенности коаксиальных пар позволяют передавать широкий спектр частот и обеспечивают высокую помехозащищённость. Это связано с закрытостью данной системы электросвязи от взаимных и внешних полей. Рассмотрим это на примере магнитного поля:



Поверхностный эффект является причиной активного сопротивления с ростом частоты.

Рассмотрим проводник а:

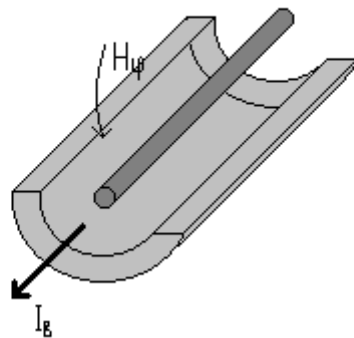


Количественной характеристикой действия вихревых токов является коэффициент вихревых токов:

$$K = \sqrt{\omega\mu\sigma}$$

Все частотно-зависимые параметры проводников цепи зависят только от вихревых токов.

Рассмотрим суммарное действие токов на проводник



Вывод: чем выше частота, тем больше рабочий ток смещается на внутреннюю поверхность внешнего проводника, и тем выше защищённость коаксиальной пары от внешних электромагнитных помех. Таким образом, мы видим, что в симметричных цепях, помехозащищённость ухудшается с ростом частоты. А в коаксиальных цепях с ростом частоты помехозащищённость, напротив, увеличивается.

5.2 Передача энергии по идеальной коаксиальной цепи

Рассмотрим процессы в коаксиальной паре без учёта действия вихревых токов, а значит и без учёта потерь в проводниках. Согласно уравнению Умова-Пойнтинга передача энергии в такой цепи будет соответствовать направлению вектора Умова-Пойнтинга вдоль оси Z:

$$W_Z = \Pi_Z = \int_0^{2\pi} E_r H_\varphi^* r d\varphi$$

Для определения величины энергии необходимо найти составляющие E_r и H_φ .

Рассмотрим систему уравнений Максвелла для этих составляющих:

$$\begin{cases} -\frac{\partial H_{\varphi}}{\partial Z} = (\sigma + i\omega\varepsilon_a) \\ \frac{\partial E_r}{\partial Z} = -i\omega\mu_a H_{\varphi} \end{cases}$$

Предполагаем, что электромагнитное поле изменяется по экспоненциальному закону и составляющие E_r и H_{φ} можно записать в следующем виде:

$$E_r = E_{r0}e^{-\gamma Z} \quad H_{\varphi} = H_{\varphi 0}e^{-\gamma Z}$$

Где γ -коэффициент распространения цепи, E_{r0} и $H_{\varphi 0}$ -начальные значения составляющих поля. Беря от этих значений первые производные по координате Z , получим:

$$\begin{cases} \frac{dE_r}{dZ} = -\gamma H_{r0}e^{-\gamma Z} = -\gamma E_r \\ \frac{dH_{\varphi}}{dZ} = -\gamma E_{\varphi 0}e^{-\gamma Z} = -\gamma H_{\varphi} \end{cases}$$

Подставим значения производных в исходные уравнения и получим:

$$\begin{cases} \gamma H_{\varphi} = (\sigma + i\omega\varepsilon_a)E_r \\ \gamma E_r = i\omega\mu_a H_{\varphi} \end{cases}$$

Разделим первое уравнение на второе:

$$\frac{E_r^2}{H_\varphi^2} = \frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\varepsilon_a}$$

$$\frac{E_r}{H_\varphi} = Z_Z$$

$$\frac{E_r}{H_\varphi} = Z_Z - \text{полное сопротивление цепи вдоль оси } Z$$

умножим первое уравнение на второе:

$$\gamma^2 = i\omega\mu_a(\sigma + i\omega\varepsilon_a)$$

$$Z_Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\varepsilon_a}}$$

Величина напряжения, действующего между проводниками цепи, может быть определена из интеграла:

$$U = \int_{r_a}^{r_b} \mathring{A}_r dr, \quad \mathring{A}_r = \frac{i\omega\mu_a}{\gamma} H_\varphi$$

Преобразуем выражение E_r :

$$E_r = \sqrt{\frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\varepsilon_a}} \frac{I}{2\pi r} \quad E_r = Z_Z \frac{I}{2\pi r}$$

$$U = \int_{r_a}^{r_b} \frac{I}{2\pi r} Z_Z dr = \frac{I}{2\pi} Z_Z \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{r} = \frac{I}{2\pi} Z_Z \ln \frac{r_b}{r_a}$$

$$Z_\epsilon = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi} Z_Z \ln \frac{r_b}{r_a}$$

Из уравнения однородной линии известно соотношение:

$$Z = R + i\omega L = \gamma Z_\epsilon \quad Y = G + i\omega C = \frac{\gamma}{Z_\epsilon}$$

$$\Rightarrow Z = R + i\omega L = \sqrt{i\omega\mu_a(\sigma + i\omega\epsilon_a)} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\epsilon_a}} \ln \frac{r_\epsilon}{r_a}$$

$$Z = i\omega\mu_a \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_\epsilon}{r_a}$$

$$R = 0, \quad L = \frac{\mu_a}{2\pi} \ln \frac{r_\epsilon}{r_a}$$

$$Y = \frac{\gamma}{Z_\epsilon} = \frac{\sqrt{i\omega\mu_a(\sigma + i\omega\epsilon_a)}}{\sqrt{\frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_\epsilon}{r_a}}}$$

$$Y = \frac{2\pi(\sigma + i\omega\epsilon_a)}{\ln \frac{r_\epsilon}{r_a}}$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln \frac{r_\epsilon}{r_a}} \quad C = \frac{2\pi\epsilon_a}{\ln \frac{r_\epsilon}{r_a}}$$

Выводы: в идеальной цепи активное сопротивление равно нулю, индуктивность не зависит от частоты и определяется только межпроводниковой внешней индуктивностью. Проводимость изоляции существенно зависит от проводимости среды. Ёмкость зависит от диэлектрической проницаемости среды.

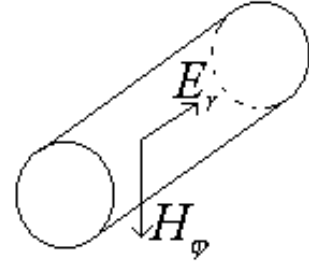
5.3 Передача энергии по коаксиальной цепи с потерями

В реальной цепи всегда действуют вихревые токи. С учётом этого уравнение Умова-Пойнтинга и направление действия векторов будет:

$$\Pi_r = \int_0^{2\pi} E_r H_\varphi^* r d\varphi$$

$$\Pi_k = I^2 Z$$

$$Z = R + i\omega L = \frac{1}{I^2} \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r d\varphi$$



Найдём E_z и H_φ .

Полное сопротивление цепи с потерями будет складываться из Z_a и Z_b .

$$Z_a = R_a + i\omega L_a \quad Z_b = R_b + i\omega L_b$$

Рассмотрим систему уравнений Максвелла для E_z и H_φ , которые путём преобразований можно представить в виде волновых уравнений второго порядка.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} = ik^2 E \quad K = \sqrt{\omega\mu_a\sigma}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial \varphi} = 0 \quad \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} = ikE_z$$

$$\text{решение : } E_z = AI(\sqrt{ikr}) + Bk_0(\sqrt{ikz})$$

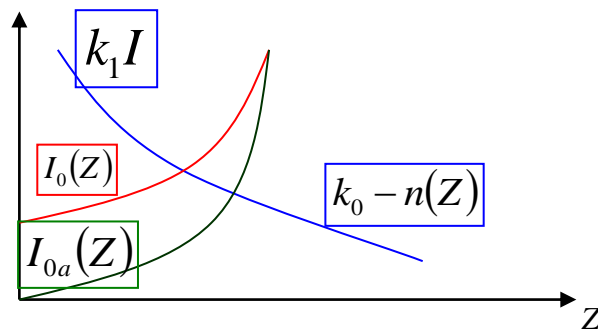
Здесь А и В - постоянные интегрирования, I_0 – Функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Данные функции Бесселя определяют изменение параметров передачи в зависимости от действия вихревых токов. В аргумент этих токов

$$k_0(\sqrt{ikr}) \text{ – функция Бесселя второго рода нулевого порядка}$$

непосредственно входит коэффициент вихревых токов коэффициент радиуса проводника r .

Графики функций Бесселя:



Рассматривая электрические процессы в проводниках, мы выясним, что с увеличением радиуса и, соответственно, координаты r величина напряжённости поля возрастает от центра к поверхности проводника, то есть поведение функции Бесселя второго рода нулевого порядка не соответствует физическому смыслу явления. Поэтому величиной k_0 пренебрегаем и решение для составляющей E_z будет иметь вид:

$$E_z = A I_0(\sqrt{ikr})$$

Из системы уравнений Максвелла можно записать выражение для H_φ :

$$\dot{I}_\varphi = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{\sqrt{ik}}{i\omega\mu_a} A I_1(\sqrt{ikr})$$

Но с другой стороны:

$$H_\varphi = \frac{1}{2\pi r}$$

Приравняв координату r к радиусу внутреннего проводника, находим постоянную интегрирования A :

$$A = \frac{I}{2\pi r_a} \frac{i\omega\mu_a}{\sqrt{ik} I_1(\sqrt{ikr_a})}$$

если $f > 60 \text{ кГц}$, то:

$$E_Z = \frac{I}{2\pi r_a} \frac{\sqrt{i\omega\mu_a}}{k} \frac{I_0(\sqrt{ikr_a})}{I_1(\sqrt{ikr_a})}$$

Подставим в решение постоянную интегрирования А:

$$I_0(\sqrt{ikr_a}) \approx I_1(\sqrt{ikr_a})$$

$$R_a + i\omega L_a = \frac{\sqrt{ik}}{2\pi r_a \sigma} \quad \sqrt{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} + i \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\Rightarrow R_a = \frac{\sqrt{2}k}{4\pi r_a \sigma} \quad L_a = \frac{\sqrt{2}k}{4\pi r_a \sigma \omega} = \frac{\sqrt{2}\mu_a}{4\pi r_a k}$$

Для медного проводника выражение можно упростить:

$$R_a = \frac{4,18\sqrt{f} 10^{-2}}{r_a} \left[\frac{\text{Ом}}{\text{км}} \right] \quad L_a = \frac{6,66}{r_a \sqrt{f}} 10^{-3} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{км}} \right]$$

Рассмотрим решение волнового уравнения Гельмгольца:

$$E_Z = AI(\sqrt{ikr}) + Bk_0(\sqrt{ikr})$$

$$H_\varphi = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_Z}{\partial r} = \frac{\sqrt{ik}}{i\omega\mu_a} [AI(\sqrt{ikr}) - Bk_1(\sqrt{ikr})]$$

$$\text{при } r = r_s \quad H_\varphi = \frac{I}{2\pi r_s}$$

Подставляя E_r и H_φ в исходные уравнения, Умова-Пойтинга, получим выражение для внешнего проводника цепи:

$$H_\varphi(r_s) = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_Z}{\partial r} = \frac{\sqrt{ik}}{i\omega\mu_a} [AI(\sqrt{ikr_s}) - Bk_1(\sqrt{ikr_s})] = \frac{I}{2\pi r_s}$$

$$H_\varphi(r_c) = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_Z}{\partial r} = \frac{\sqrt{ik}}{i\omega\mu_a} [AI(\sqrt{ikr_c}) - Bk_1(\sqrt{ikr_c})] = 0$$

$$R + i\omega L_{\bar{\epsilon}} = \frac{\sqrt{ik}}{2\pi r_{\bar{\epsilon}} \sigma} \frac{I_0(\sqrt{ik}r_{\bar{\epsilon}})k_1(\sqrt{ik}r_c) + k_0(\sqrt{ik}r_{\bar{\epsilon}})I_1(\sqrt{ik}r_c)}{I_1(\sqrt{ik}r_c)k_1(\sqrt{ik}r_{\bar{\epsilon}}) - k_1(\sqrt{ik}r_c)I_1(\sqrt{ik}r_{\bar{\epsilon}})}$$

Функции Бесселя можно представить в виде асимптотически сходящихся рядов следующего вида:

для $kr > 5$

$$I_0(\sqrt{iZ}) = \frac{e^{\sqrt{iZ}}}{\sqrt{2\pi\sqrt{iZ}}} \left(1 - \frac{1}{8\sqrt{iZ}} + \dots \right)$$

$$I_1(\sqrt{iZ}) = \frac{e^{\sqrt{iZ}}}{\sqrt{2\pi\sqrt{iZ}}} \left(1 - \frac{3}{8\sqrt{iZ}} + \dots \right)$$

$$k_0(iZ) = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{iZ}}} e^{-\sqrt{iZ}} \left(1 - \frac{1}{8\sqrt{iZ}} + \dots \right)$$

Ограничивая эти ряды тремя составляющими, и, подставляя их значения в сопротивление проводника, получим:

$$R + i\omega L_{\bar{\epsilon}} = \frac{\sqrt{ik}}{2\pi r_{\bar{\epsilon}} \sigma} \left[\operatorname{cth}(\sqrt{ikt}) - \frac{1}{8\sqrt{ik}} \left(\frac{3}{r_c} + \frac{1}{r_{\bar{\epsilon}}} \right) \right] \quad \text{где } t = r_c + r_{\bar{\epsilon}}$$

$$R_{\bar{\epsilon}} = \frac{\sqrt{2k}}{4\pi r_{\bar{\epsilon}} \sigma} \quad L_{\bar{\epsilon}} = \frac{\sqrt{2\mu_a}}{4\pi r_{\bar{\epsilon}} k}$$

Для медных проводников:

Наряду с внутренней индуктивностью проводников в коаксиальной цепи

$$R_{\sigma} = \frac{4,18\sqrt{f}}{r_{\epsilon}} 10^{-2} \left[\frac{\text{Ом}}{\text{км}} \right]$$

$$L_{\sigma} = \frac{66,6}{\sqrt{f}} \frac{1}{r_{\epsilon}} 10^{-4} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{км}} \right]$$

действует межпроводниковая индуктивность.

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_a}{I} \int_{r_a}^{r_{\epsilon}} \frac{I}{2\pi r} dr = \frac{4\pi 10^{-4} \mu}{2\pi} \ln \frac{r_{\epsilon}}{r_a} = 2 \ln \frac{r_{\epsilon}}{r_a} 10^{-4} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{км}} \right]$$

$$L = L_a + L_{\epsilon} + L_{\text{вн}} = \left[2 \ln \frac{r_{\epsilon}}{r_a} + \frac{66,6}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_{\epsilon}} \right) \right] 10^{-4} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{км}} \right]$$

Если внешний проводник сделан из алюминия, то:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \sqrt{f} \left[\frac{4,18}{r_a} + \frac{5,38}{r_{\hat{a}}} \right] 10^{-2} \left[\frac{\hat{I} \hat{i}}{\hat{e} \hat{i}} \right] \\ L = \left[2 \ln \frac{r_{\hat{a}}}{r_{\hat{a}}} + \frac{1}{\sqrt{f}} \left(\frac{66,6}{r_a} + \frac{86}{r_{\hat{a}}} \right) \right] 10^{-4} \left[\frac{\tilde{A} \hat{i}}{\hat{e} \hat{i}} \right] \end{array} \right.$$

5.4 Емкость и проводимость изоляции коаксиальной цепи

В изоляции двухпроводных цепей происходят два основных процесса:

- ✚ Поляризация
- ✚ Переориентация диполей

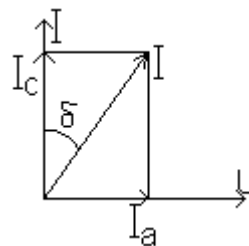
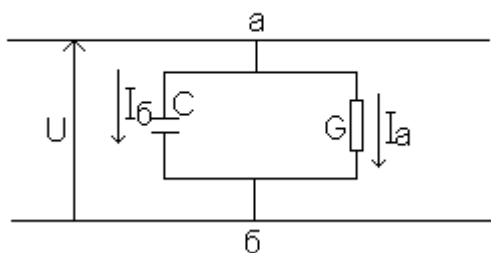
В отличие от проводников в изоляции отсутствуют свободные носители заряда. Поэтому если к проводникам приложено напряжение, связанные заряды в пределах атомов смещаются на определённое расстояние, то есть происходит поляризация диполей. Степень поляризации диэлектрика характеризуется его

диэлектрической проницаемостью. Если напряжение переменное, то происходит переориентация диполей с частотой этого напряжения. При перемещении диполей, за счёт трения выделяется тепловая энергия. Чем выше диэлектрическая проницаемость изоляции и выше частота, тем большие потери энергии происходят в диэлектрике.

Соотношение между токами определяет величину потерь. Чем больше активная составляющая I_a , тем больше потери.

Количественно величина потерь оценивается **tg δ - тангенсом угла потерь**.

Эквивалентная схема параметров изоляции



$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon_a} \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{r_b}{r_a}$$

$$C = \frac{\epsilon_a 10^{-6}}{18 \ln \frac{r_b}{r_a}} \left[\frac{\Phi}{\text{кМ}} \right]$$

$$\text{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{UG}{\omega CU} = \frac{G}{\omega C}$$

$$G = G_0 + G_f = \frac{1}{R \epsilon \zeta} + \omega \tilde{N} \text{tg} \delta$$

$$R \epsilon \zeta > 10000 \hat{I} \hat{i} \cdot \hat{e} \hat{i} \Rightarrow \sigma = G_f = \omega C \text{tg} \delta \hat{y} \left[\frac{\tilde{N} \hat{i}}{\hat{e} \hat{i}} \right]$$

$$\tilde{N} = \frac{Q}{U} \quad U = \int_{r_a}^{r_b} E dr \quad \dot{A} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_a r}$$

5.5 Первичные и вторичные параметры коаксиальной цепи. Частотные зависимости параметров передачи

Аналитические выражения первичных параметров передачи найдены в пункте «передача энергии в цепи с потерями». Вторичные параметры могут быть найдены из первичных параметров с использованием формул однородной линии.

Иногда удобнее параметры коаксиальной цепи выразить через конструктивные параметры изоляции.

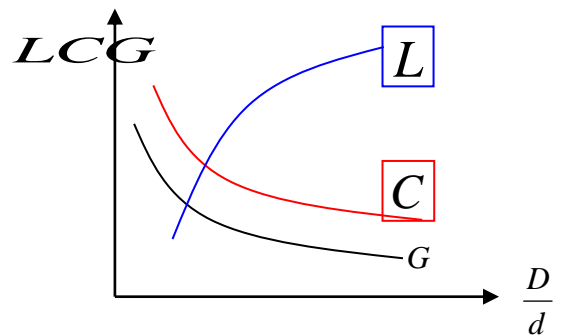
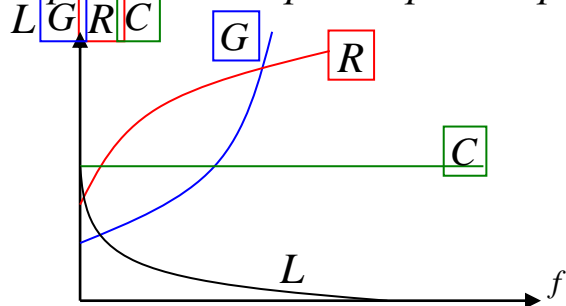
$$\alpha = \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) 8.68 \left[\frac{\text{Дб}}{\text{км}} \right]$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \left[\frac{\text{рад}}{\text{км}} \right] \quad Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left[\frac{\text{км}}{\text{с}} \right]$$

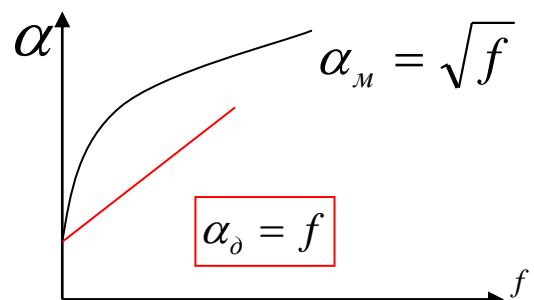
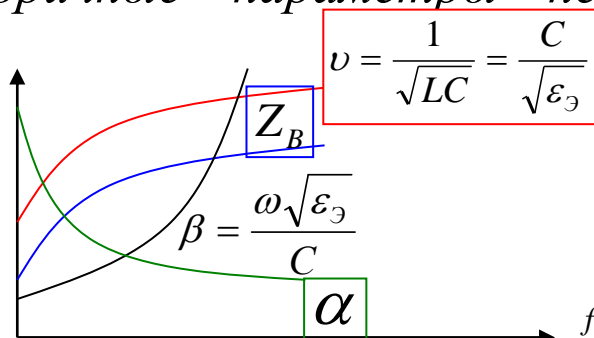
$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \frac{2,6\sqrt{\varepsilon_3}f}{\ln \frac{D}{d}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) 10^{-3} + 9,1f \sqrt{\varepsilon_3} \text{tg} \delta_3 10^{-5} \left[\frac{\text{дб}}{\text{км}} \right]$$

Частотные зависимости

первичные параметры передачи



вторичные параметры передачи



Оптимальное соотношение диаметров проводников коаксиальной цепи

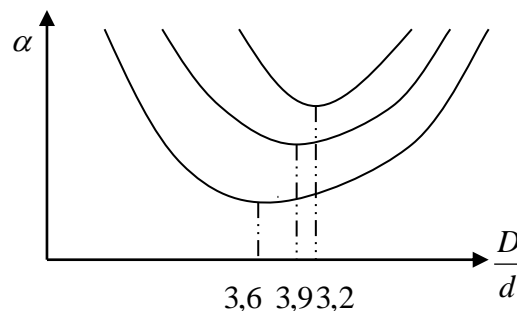
Существует определённое оптимальное отношение диаметров проводников коаксиальной цепи, обеспечивающее минимум затухания.

$$\alpha_m = \frac{2,6\sqrt{\epsilon_0} f}{l \frac{D}{d}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) 10^{-3}$$

пусть $x = \frac{D}{d}$, тогда $\alpha_m = \min$ при $\frac{\partial \alpha_m}{\partial x} = 0$

Для различных металлов:

Металл	Cu	Al	Fe	Pb	Zn
D/d	3,6	3,9	4,2	5,2	4,5

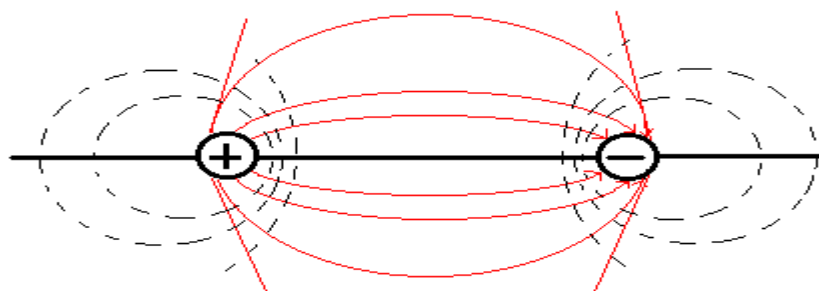


Таким образом, отклонение размера коаксиального кабеля от оптимального наиболее существенным образом сказывается при соотношении меньших оптимальных. Поэтому в реальных цепях с учётом технического допуска соотношение для проводников выбирают несколько большим оптимально.

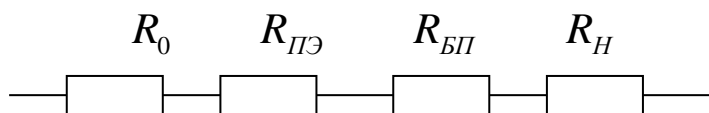
5.6 Электрические процессы в симметричных кабелях

Электромагнитное поле симметричной цепи:

Симметричные цепи – это открытые НСЭ, поэтому электромагнитное поле



действует на значительное расстояние, приводя к повышенным взаимным влияниям между цепями и, наводя электромагнитное поле в экранах и оболочках в соседних цепях, окружающих металл. Кроме этого электромагнитное поле обладает существенной симметрией относительно проводников. Поэтому при рассмотрении параметров передачи необходимо учитывать эти особенности. Активное сопротивление (один из важнейших параметров передачи) будет состоять из четырёх слагаемых:



$$R = R_0 + R_{ПЭ} + R_{БП} + R_H$$

$R_{БП}$ - сопротивление за счёт эффекта близости.

R_H - потери в окружающих массах.

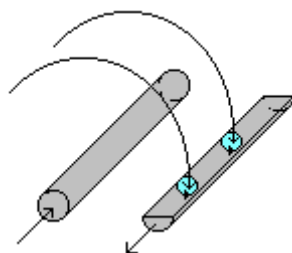
R_0 - сопротивление цепи.

$R_{ПЭ}$ - сопротивление за счёт поверхностного эффекта.

$$R_0 = \rho \frac{\ell}{S} \quad S = \frac{\pi d_0^2}{4}$$

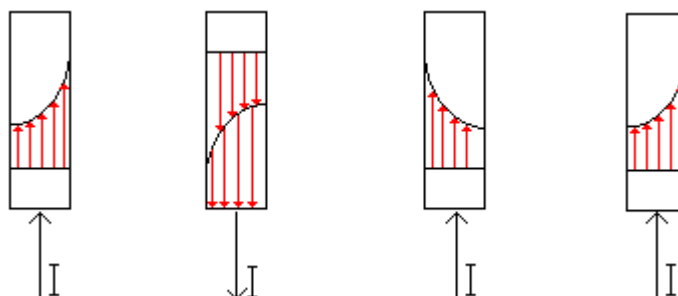
сопротивление симметричной цепи $R_0 = \frac{8000\rho}{\pi d_0^2}$

Возникновение эффекта близости.



Увеличение сопротивления влечёт за собой увеличение затухания.

Смещение плотности тока в толще проводника.



Наведение вихревых токов ведёт к нагреванию оболочек и экранов.

В реальной симметричной цепи действуют вихревые токи, приводящие к увеличению активного сопротивления при возрастании частоты передаваемого сигнала. В таких цепях действуют:

- ✚ Поверхностный эффект,
- ✚ Эффект близости
- ✚ Эффект потерь окружающих масс.

Всю энергию, потребляемую проводниками извне, можно представить в виде вектора Пойнтинга, направленного по координате r внутрь проводника. Согласно теореме Умова-Пойнтинга:

$$P_r = \int_0^{2\pi} E_Z H_\varphi^* r d\varphi$$

Согласно закону Джоуля-Ленца:

$$W = I^2 Z$$

$$\dot{I}_r = W = I^2 Z$$

$$Z = R + i\omega L = \frac{1}{I^2 \int_0^{2\pi} E_Z H_\varphi^* r d\varphi}$$

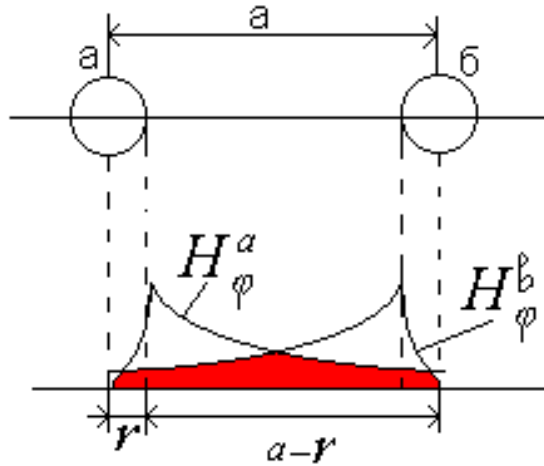
Система уравнений Максвелла для металлических симметричных цепей имеет вид:

Преобразуем систему уравнений Максвелла в волновое уравнение для составляющей E_Z :

$$\frac{\partial^2 E_Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_Z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_Z}{\partial \varphi^2} = \begin{cases} K_M^2 E_Z \\ K_\varphi^2 E_Z \end{cases}$$

Составляющую магнитного поля H_φ находим аналогично предыдущему случаю:

$$H_\varphi = \frac{B_0}{i\omega\mu_a r} + \frac{1}{i\omega\mu_a} \sum_{n=1}^{\infty} (B_n r^{n-1} - C_n r^{-n-1}) \cos n\varphi$$



Для нахождения постоянных интегрирования рассмотрим распределение магнитного поля между проводами симметричной цепи:

С учётом данных условий, решая совместно волновые уравнения для металла и диэлектрика, можно получить следующее выражение для активного

$$R = R_a + R_e = R_0 \left[1 + F(kr_0) + \frac{G(kr_0) \left(\frac{d_0}{a} \right)^2}{1 - H(kr_0) \left(\frac{d_0}{a} \right)^2} \right] \left[\frac{\text{Ом}}{\text{км}} \right]$$

сопротивления симметричной цепи.

Здесь $F(kr_0)$, $G(kr_0)$, $H(kr_0)$ - коэффициенты от модифицированных функций Бесселя, взятые от вещественного аргумента kr_0 .

$$k = \sqrt{\omega\mu\epsilon} - \text{коэффициент вихревых токов}$$

Для удобства нахождения коэффициентов составлены таблицы коэффициентов функций Бесселя в зависимости от аргумента kr_0 .

Внутренняя индуктивность симметричной цепи:

$$L = L_a + L_e = \mu Q(kr_0) 10^{-4} \left[\frac{\Gamma H}{\text{кМ}} \right]$$

Полное активное сопротивление симметричной цепи:

$$R = 2R_0 \chi \left[1 + F(kr_0) + \frac{G(kr_0) \left(\frac{d_0}{a} \right)^2}{1 - H(kr_0) \left(\frac{d_0}{a} \right)^2} \right] + R_M \quad \left[\frac{\text{Ом}}{\text{кМ}} \right]$$

Где χ – коэффициент скрутки цепи. Он характеризует линейное удлинение проводников при их скрутке по сравнению с длиной цепи. В зависимости от шага скрутки $\chi=1,01 \dots 1,07$. Для реальных симметричных цепей коэффициент скрутки равен 1,02.

P – коэффициент, учитывающий вид скрутки цепи. Для парной скрутки $P=1$, для двойной парной скрутки $P=2$, для звёздной $P=5$.

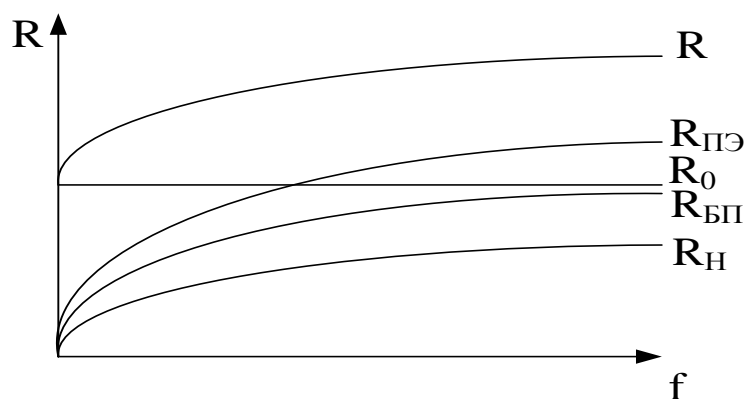
Величина потерь в окружающих металл массах рассчитана на частоте 200кГц и сведена в таблицу для рассчитанных значений сердечника кабеля.

Величина потерь в окружающих металл массах представляет собой величину $R_{M200} = R_{M\perp 200} + R_{M\parallel 200}$, где $R_{M\parallel 200}$ – потери в соседних цепях.

$$R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f}{200}}$$

Для нахождения потерь на частотах, не равных 200кГц, используют соотношение:

Графики изменения активного сопротивления:



В диэлектрике симметричной цепи действуют два процесса:

1. Поляризация и образование диполей
2. Переориентация диполей с частотой сигнала.

При переориентации диполей за счёт их трения выделяется тепловая энергия. Поэтому с ростом частоты в любой изоляции тепловые потери возрастают. Величина таких потерь количественно характеризуется значением **тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$** . Чем он больше, тем больше потери и хуже изоляция.

$\text{tg}\delta$ бумаги = $2 \cdot 10^{-2}$, $\text{tg}\delta$ полиэтилена = $2 \cdot 10^{-4}$

Рассмотрим расчётные формулы для потерь:

$$\varepsilon_a = \varepsilon \varepsilon_0 = \varepsilon \frac{10^{-6}}{36\pi} \left[\frac{\Phi}{\text{кМ}} \right]$$
$$C = \frac{\chi \varepsilon_0 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{a - r_0}{r_0} \right) \psi} \left[\frac{\Phi}{\text{кМ}} \right]$$

ψ – коэффициент изменения ёмкости

Проводимость изоляции:

$$G = \omega C \text{tg} \delta_{\varepsilon} = G_0 + G_f$$

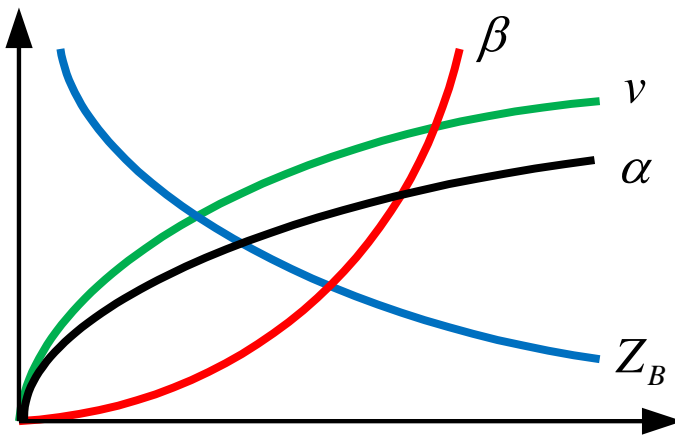
$$G_0 = \frac{1}{R_{из}} \quad G_f = \omega C \text{tg} \delta_{\varepsilon}$$

Вторичные параметры передачи симметричных цепей.

Для симметричных цепей справедливы те же самые формулы, что и для коаксиальных цепей, однако в ряде случаев удобнее выражать вторичные параметры симметричных цепей через конструктивные размеры, и параметры проводников и изоляции.

При этом для медных симметрических цепей:

$$\alpha = \frac{2,6\sqrt{\varepsilon f} \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{a-r}{r}} \left(\frac{1}{2r} + \frac{r}{a^2} \right) + 9,08 \cdot f \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-5}, \left[\frac{\ddot{a}A}{\hat{e}i} \right]$$



$$Z_{\hat{A}} = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \ln \frac{a-r}{r}, [\hat{I} \hat{i}]$$

$$\beta = \frac{\omega \sqrt{\varepsilon}}{c}$$

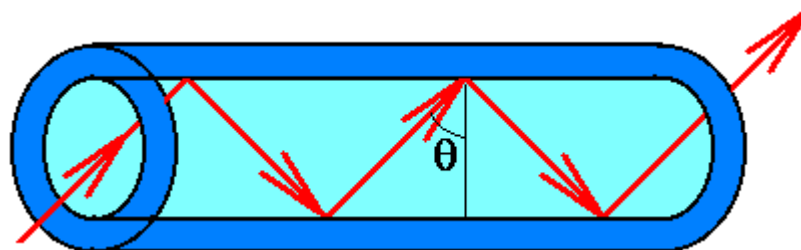
$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$$

Лекция №6

6.1 Волоконные световоды. Принцип действия, параметры передачи

В отличие от волноводов, волоконные световоды имеют двухслойную структуру и фактически являются частным случаем диэлектрических волноводов. Волоконные световоды могут быть изготовлены из окиси кремния SiO₂ с высокой степенью очистки (10⁻⁹ примесей).

В простейшем случае волоконные световоды могут быть полимерными.



Показатель преломления:

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu} = \sqrt{\varepsilon} \quad \text{т.к. } \mu = 1$$

Сердцевина должна быть оптически более плотной, чем оболочка.

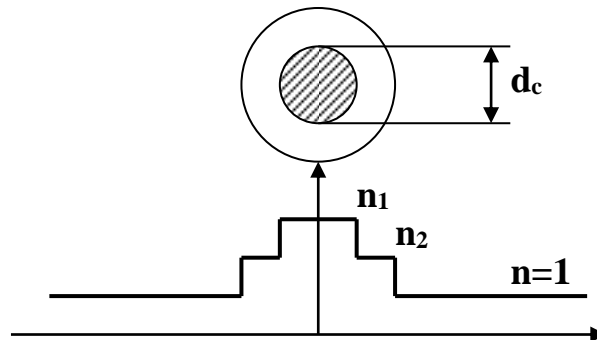
Волокна делятся на:

✚ ступенчатые $n_1 = \text{const}$ è $n_2 = \text{const}$.

✚ градиентные $n_1 = f(r)$.

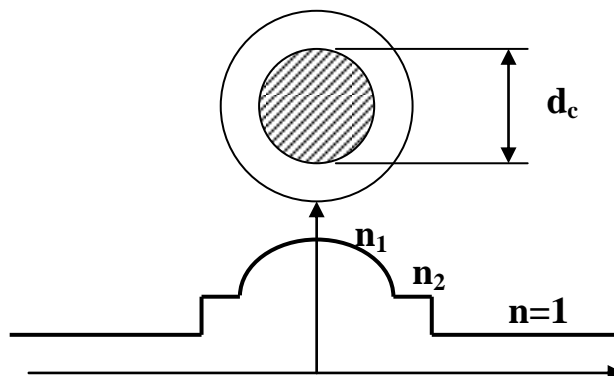
В зависимости от диаметра сердцевины волокна подразделяются на многомодовые (50÷62,5мкм), и одномодовые (8÷10мкм).

Ступенчатый показатель преломления:



По оболочке и много- и одномодовые волокна имеют одинаковый диаметр 125мкм.

Градиентные волокна, как правило, многомодовые.



Относительный показатель преломления ОВ: $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ [$= 0,001...0,01$]

Число распространяемых мод: $N = \left(\frac{\pi d_c}{\lambda} n_1 \right)^2 \Delta$

Мода – это электромагнитный образ волны, характеризуется числом минимумов и максимумов волны в поперечном сечении сердцевины световода.

Как правило, в волноводах распространяются гибридные моды HE_{nm} или EH_{nm} , где n – по периметру, m – по диаметру.

HE_{11} – мода одномодового режима.

Лучи света, распространяющиеся по волоконному световоду имеют двойственную природу:

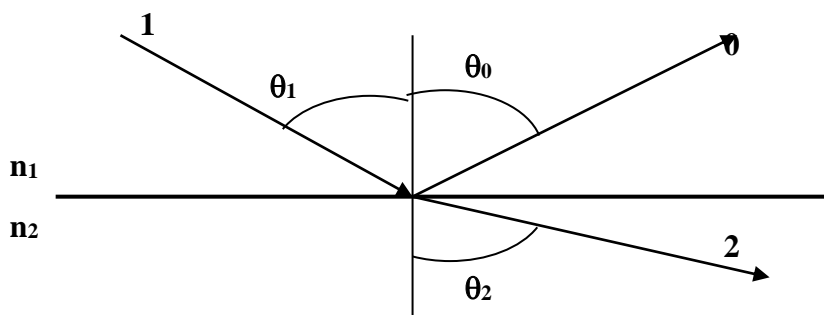
- ✚ Волновую, которая характеризует луч света как электромагнитную волну очень высокой частоты $10^{13} - 10^{15}$ Гц.
- ✚ Квантовую, т.е. представляет собой дискретные пучки квантов или корпускул излучаемых источником и распространяющихся по законам геометрической оптики.

Соответственно существуют две теории света:

- ✚ Волновая
- ✚ Корпускулярная (квантовая).

Строгое исследование процесса распространения света может быть выполнено только на основе волновой теории путем решения систем уравнений Максвелла для соответствующих граничных условий. Однако, в большинстве случаев, когда $x \ll dc$ можно воспользоваться простой квантовой теорией на основе законов геометрической оптики.

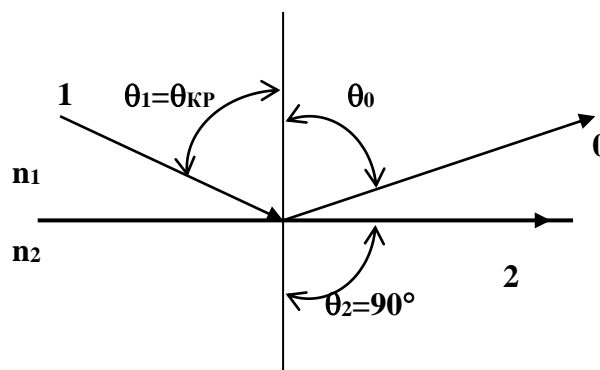
Рассмотрим процессы в световоде согласно данной теории.



$$n_1 > n_2 \Rightarrow \theta_2 > \theta_1$$

$$\theta_1 = \theta_0$$

Согласно закону Снеллиуса $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$



Закон I Прямолинейное распространение света в оптической среде.

Закон II Независимости световых пучков или лучей, согласно которому в оптической среде могут существовать бесконечное количество независимых лучей.

Закон III На границе оптически однородной среды существует отраженный луч, причем угол падения луча на границу раздела сред будет равен углу отражения.

Закон IV – Закон Снеллиуса, который определяет наличие полного внутреннего отражения, когда $n_1 > n_2$.

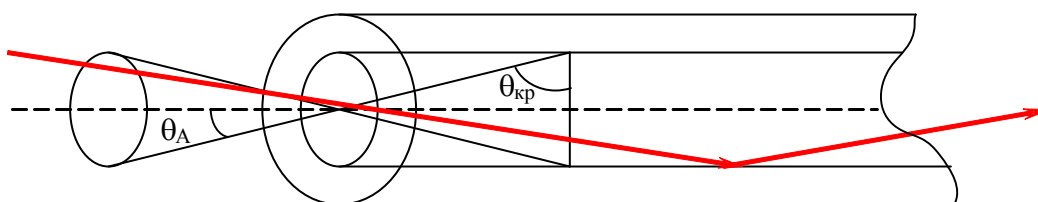
Защита волокна.

Основной защитой волокна от механических разрушений и развития микротрещин является первичное защищающее упрочняющее покрытие (ПЗУП). Как правило, ПЗУП представляет собой эпоксиакрилатный лак, нанесенный методом напыления (экструзии) на поверхность оболочки.

Наряду с ПЗУП обычно существует ВЗУП, выполненное также из лака или полиэтилена высокой плотности. Все волокна для кабелей дальней связи имеют ВЗУП лаковое, стационарные – полимерное ВЗУП. Диаметр волокна с защитным покрытием составляет величину 240÷700мкм.

Апертура

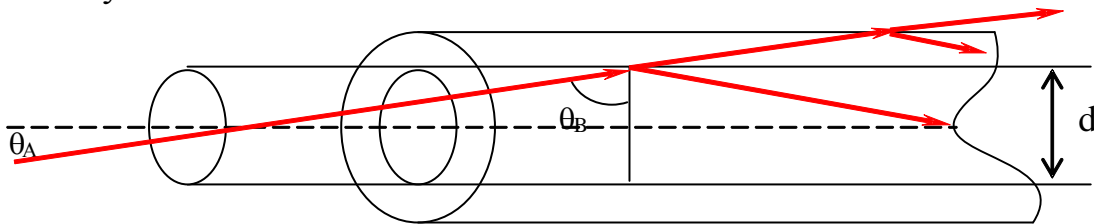
Апертурным углом θ_A называют угол между осью и направляющей светового конуса, для которого выполняется условие полного внутреннего отражения для всех лучей, попадающих в пределы данного конуса. Таким образом, апертурному углу соответствует предельный угол полного внутреннего отражения.



Лучи, для которых выполняется условие полного внутреннего отражения, называются направляемыми лучами.

Лучи, покидающие пределы сердцевины, т.е. преломленные подразделяются на вытекающие и излучаемые. Таким образом, полезными для передачи информации являются только направляемые лучи. Излучаемые и вытекающие лучи являются паразитными и приводят к потере световой энергии. Поэтому стараются световой поток от источника излучения направить в торец ОВ под углом не больше апертурного, чтобы большая часть энергии распространялась в виде направляемых лучей. Кроме перечисленных выше, все лучи делятся на

меридиальные и косые. Все направляемые лучи являются меридиальными. Все паразитные лучи в основном косые.



Как и у обычного волновода, у волоконного световода существует своя критическая длина волны $\lambda_{кр}$ и частота отсечки f_0 .

$$\cos \theta_B = \frac{\lambda}{d} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$\lambda_{кр} = d \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \frac{d}{n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$f_0 = \frac{c}{d} \frac{1}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

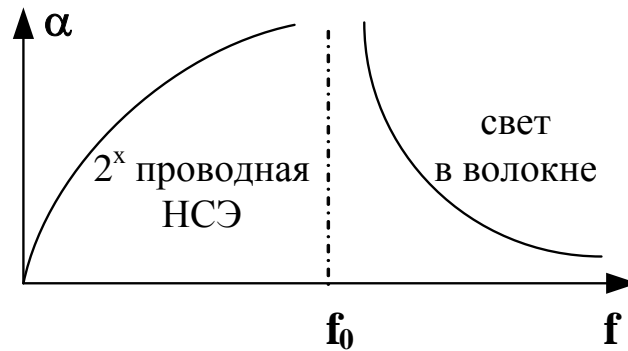
$$\boxed{\sin \theta_A = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad \text{— числовая апертура}$$

$$NA_{\text{эф}} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\sqrt{2}} \quad \text{— эффективная числовая апертура}$$

По величине NA все волокна делятся на 2 вида:

- ✚ низкоапертурные ($NA=0,1 \dots 0,2$)
- ✚ высокоапертурные ($NA=0,2 \dots 0,5$).

Рассматривая затухание светового луча в световоде, изобразим графически частотную зависимость.



Наряду с лучевой теорией распространения света ряд процессов (в частности дифракция, интерференция) могут быть пояснены только с использованием волновой теории света.

6.2 Волновая теория света

Согласно этой теории систему уравнений Максвелла можно представить в виде волнового уравнения 2-го порядка при рассмотрении процессов в сердцевине и оболочке. Рассмотрим волновое уравнение для составляющей электрического поля, действующего вдоль оси Z в сердцевине световода.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + g_1^2 E_z = 0$$

Аналогично волновое уравнение можно составить для НЭ:

g_1^2 – поперечный коэффициент распространения в сердцевине

$$g_1^2 = k_1^2 - \beta^2, \text{ где } k_1 - \text{ волновое число среды, } k_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}.$$

β – коэффициент распространения в волоконном световоде.

Для оболочки световода уравнение будет аналогичным. В уравнении вместо g_1^2 будет g_2^2 – поперечный коэффициент распространения в оболочке световода.

$$g_2^2 = \beta^2 - k_2^2, \text{ где } k_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda}.$$

Решением данных волновых уравнений являются функции Ханкеля. Это цилиндрические функции 3-го рода. В общем случае существует бесконечное количество решений данных волновых уравнений, которое может быть представлено в виде суммы, называемой нормированной частотой световода.

Нормированная частота световода:

$$V = g_1 r + g_2 r$$

где r - радиус сердцевины и оболочки.

Нормированную частоту, как сумму решений для сердцевины и оболочки, можно представить как $\nu = P_{nm}$ при условии, что весь световой поток распространяется в сердцевине

$$\nu = P_{nm} = g_2 r$$
$$\nu = g_1 a = P_{nm}; \quad 0 < P_{nm} < 2,405$$

$N = \nu^2$ – ступенчатое волокно.

$N = \frac{\nu^2}{2}$ – градиентное волокно.

6.3 Затухание в оптических волокнах

Затухание при передаче оптических сигналов по ОВ складывается из следующих составляющих:

α_c – собственное затухание ОВ

α_n – затухание поглощения

α_{np} – затухание примесей

α_p – затухание рассеяния

α_{uk} – затухание в инфракрасном диапазоне.

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{np} + \alpha_{uk}$$

При изготовлении ОК:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k$$

α_k – кабельное затухание, которое определяется изгибами ОВ в структуре сердечника кабеля, т.е. α_k будет определяться рассеянием энергии на изгибах волокна.

Рассмотрим **механизм возникновения составляющих затухания.**

Составляющая α_n связана с тем, что частицы кварца имеют способность поляризоваться и переориентироваться в пространстве, как и частицы любого другого диэлектрика. Таким образом α_n определяется тепловыми потерями световой энергии в структуре волоконного световода. Также как и у обычного диэлектрика здесь вводится понятие $\text{tg}\delta$. Однако, для чистого кварца величина $\text{tg}\delta$ значительно меньше, чем у самого лучшего диэлектрика ЭКС. Для кварца $\text{tg}\delta \approx 10^{-10}$

$$\alpha_n = \frac{\pi n t g \delta}{\lambda} = 8,689 \text{ дБ / км}$$

Составляющая потерь на примесях α_{np} зависит от наличия примесей в структуре кварца – это ионы Fe, Cu и др. Кроме того, в составе световода могут действовать гидроксильные группы OH–, также приводящие к увеличению затухания.

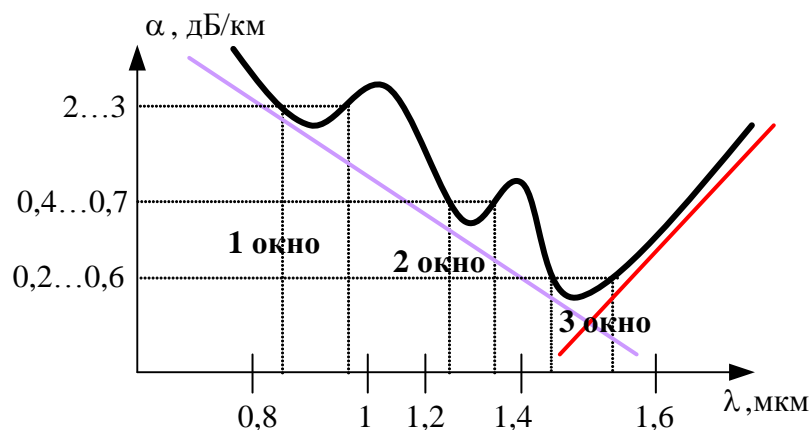
Затухание рассеяния $\alpha_p = \frac{k_p}{\lambda^4}$ связано с рассеянием световой энергии на

различных локальных изменениях показателя преломления сердцевин, т.е. неоднородностей. При этом нарушается условие полного внутреннего отражения и световая энергия покидает сердцевину.

Аналогично действуют потери на изгибах волокна, т.е. световой поток на изгибах покидает сердцевину.

Составляющая затухания в инфракрасной части спектра α_{uk} связана с работой на длинах волн 1,55 мкм и более. Вследствие того, что в кварце существует два резонансных явления, связанных с резонансом электронов атомов, резко возрастает затухание распространения волны. Таким образом, для $\lambda=0,85$ мкм и менее следует учитывать затухание в ультрафиолетовой части спектра.

Суммарная зависимость затухания ОВ имеет вид:



В чистом кварце, даже при высшей степени очистки, нельзя добиться затухания ниже указанных значений. Для дальнейшего уменьшения затухания необходимо убрать линию в ИКЧС. Этого можно добиться путем легирующих добавок. В качестве таких добавок используются эрбий и фторид натрия.

В легированных волокнах можно добиться затухания тысячных долей дБ/км.

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 t g \delta}{\lambda} \text{ дБ / км}$$

$$\alpha_{ac} = \frac{k_p}{\lambda^4}, \text{ дБ / км}$$

Релеевский коэффициент k_p характеризует степень неоднородностей ОВ.

6.4 Дисперсия оптических волокон

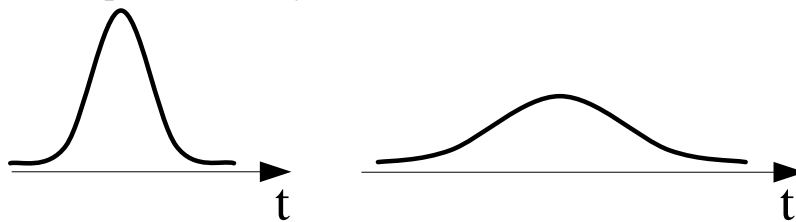
Дисперсией ВС называется рассеяние во времени модовых или спектральных составляющих оптического сигнала. **Уширение** импульсов есть следствие действия дисперсии.

Межмодовая (модовая) дисперсия.

$$\tau_{MM} \rightarrow N = \left(\frac{\pi dc}{\lambda} \right)^2 \Delta \quad \Delta \text{ – относительный показатель преломления.}$$

$$\tau_{MM} = \sigma_{MM} = V(N)$$

Каждая мода обладает своей траекторией распространения, соответственно своей скоростью и своим временем прихода на выход ОВ, таким образом размывается на выходе в колоколообразный импульс.



Дисперсия за счет спектральных составляющих оптического сигнала называется хроматической дисперсией.

$$\tau_{xp} = \sigma_{xp} = \sigma_{вв} + \sigma_{mat}$$

$\sigma_{вв} = \gamma(\lambda)$ – зависимость коэффициента распространения γ по ВС от λ .

$\sigma_{mat} = n(\lambda)$ – характеризуется зависимостью показателя преломления от λ .

Общее действие хроматической дисперсии задается параметрами $D(\lambda)$

$$D(\lambda) = \sigma_{вв}(\lambda) + \sigma_{mat}(\lambda) \text{ коэффициент берется на 1 км.}$$

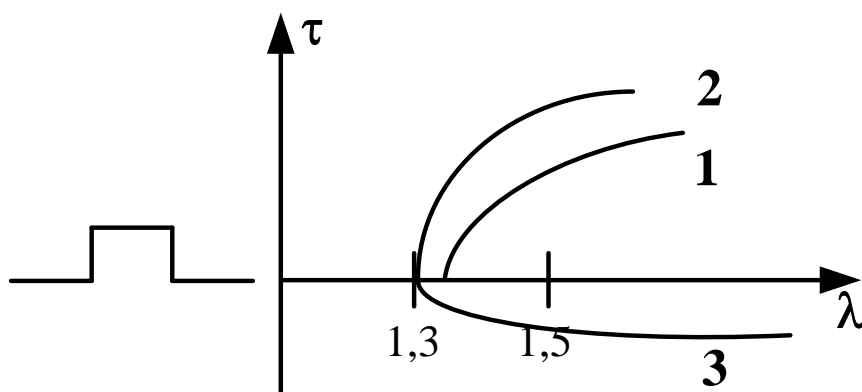
В общем случае дисперсия ОВ определяется как среднеквадратическое значение

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{mm}^2 + \sigma_{xp}^2}$$

В одномодовых волокнах модовой дисперсии нет.

Таким образом в силу своих плохих дисперсионных характеристик многомодовые волокна в настоящее время используются только на локальных сетях. На транзитных сетях и сетях доступа используются одномодовые волокна.

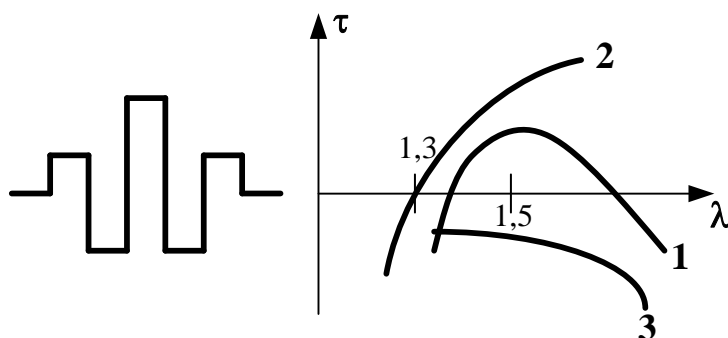
Для снижения хроматической дисперсии в одномодовых волокнах используют то, что материальная дисперсия может менять свой знак. Точка в которой она равна нулю называется точкой нулевой материальной дисперсии. Она соответствует длине волны 1,28 мкм для кварца.



Точка нулевой дисперсии для ступенчатого одномодового волокна смещается на $\lambda=1,3\text{мкм}$. Таким образом, ступенчатые одномодовые волокна можно использовать во втором окне прозрачности.

Меняя профиль показателя преломления смещают точку нулевой хроматической дисперсии в область третьего окна прозрачности, такие волокна называются волокнами со смещенной дисперсией.

Применяя W-образный показатель преломления, получают волокна со сглаженной хроматической дисперсией в пределах окна прозрачности.



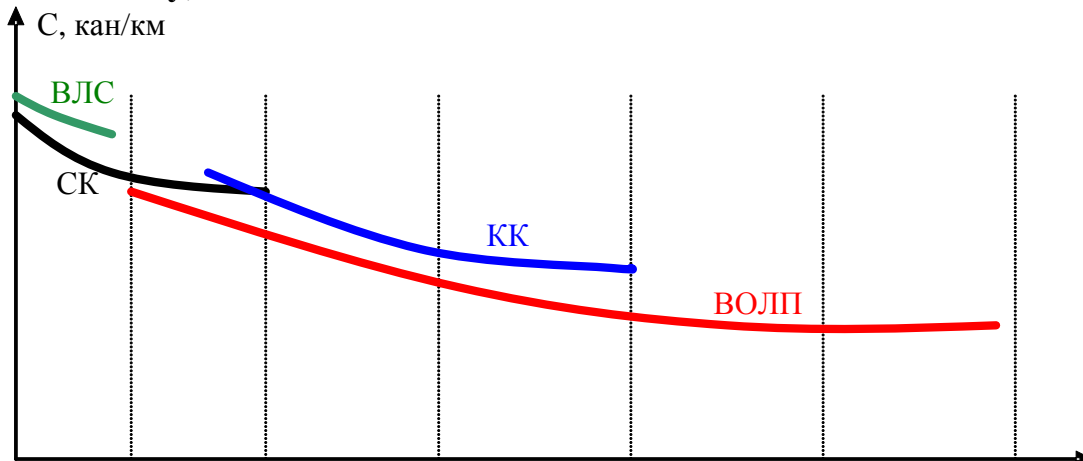
Затухание и дисперсия являются двумя основными параметрами, определяющими длину регенерационного участка систем передачи.

6.5 Сравнение различных НСЭ

Сравнение НСЭ по качеству:

Тип НСЭ	Т	Параметры затухания			Внешнее поле	В	Частотный диапазон	Ч	Количество каналов
		Затухание в металле	Затухание в диэлектрике	Затухание излучения					
К	С	-	+	-	+	о 106	д	до 1000	
ЛС	В	-	+	+	+	о 105	д	до 15	
К	К	-	+	-	-	о 109	д	до 10 ⁴	
металл. волновод	М	-	+	-	-	010÷1012	1	до 10 ⁵	
ОЛП	В	-	+	-	-	012÷1015	1	до 10 ⁶	

Как по качеству, так и по стоимости наиболее выгодным является ВОЛП.



Взаимные влияния в НСЭ.

7.1 Общие понятия об электромагнитных влияниях

Цепи и тракты НСЭ постоянно находятся под воздействием сторонних ЭМП того, или иного происхождения.

Различают две группы сторонних электромагнитных полей:

- + Внешние, энергетически не связанные с НСЭ.
- + Внутренние, это соседние физические или искусственные цепи данной линии создающие взаимные влияния.

Внешние источники подразделяются:

- + *естественные* – это грозовые разряды, солнечная радиация, космическое излучение, магнитные бури.
- + *созданные человеком* – это высоковольтные ЛП, ЭЖД, городской электротранспорт, а также радиостанции.

Источники сторонних электромагнитных полей воздействуют как на сигнал, передаваемый по ЛС, так зачастую и на человека и оборудование, работающее по ЛС. Поэтому все сторонние электромагнитные поля подразделяются на два вида:

- + *Опасные*, создающие возможность повреждения ЛС, оборудования и обслуживающего персонала. Опасными источниками являются также источники наводящие напряжение выше 36В.
- + Наводящие напряжение ниже 36В называются *мешающими*. Они могут резко снизить помехозащищенность линии и привести к ухудшению качества передачи.

Типичным источником электромагнитных полей являются разряды молний вблизи от ЛС. Типичными мешающими влияниями являются радиостанции работающие в спектре частот передаваемых по ЛС.

Отличительными особенностями взаимных и внешних влияний являются:

- + Расстояние от ЛС до внешних источников значительно больше поперечных размеров ЛС.
- + Интенсивность внешних источников намного больше, чем у источников взаимных влияний.
- + Внешние источники действуют на ограниченных участках ЛС и, как правило, непродолжительное время.
- + Взаимные влияния действуют на всем протяжении ЛС в течении всего времени эксплуатации ЛС.

Хотя интенсивность взаимных влияний на много меньше, но в ряде случаев они могут полностью нарушить процесс передачи по ЛС.

7.2 Основные определения и методы исследования взаимных влияний

В теории взаимных влияний между цепями ЛС приняты следующие определения:

1-я цепь (влияющая цепь) – это цепь, создающая первичное влияющее электромагнитное поле.

2-я цепь (цепь подверженная влиянию) – это цепь на которую воздействует влияние электромагнитного поля и в которой определяются помехи.

Различают **ближний конец линии** кабеля цепи тракта – это конец линии на котором включается генератор влияющих цепей. И **дальний конец линии** – это конец линии на котором включена нагрузка влияющей цепи.

Соответственно определяют действие тока, напряжения и мощности.

P_{10} – мощность в начале цепи.

P_{1L} - мощность в конце влияющей цепи.

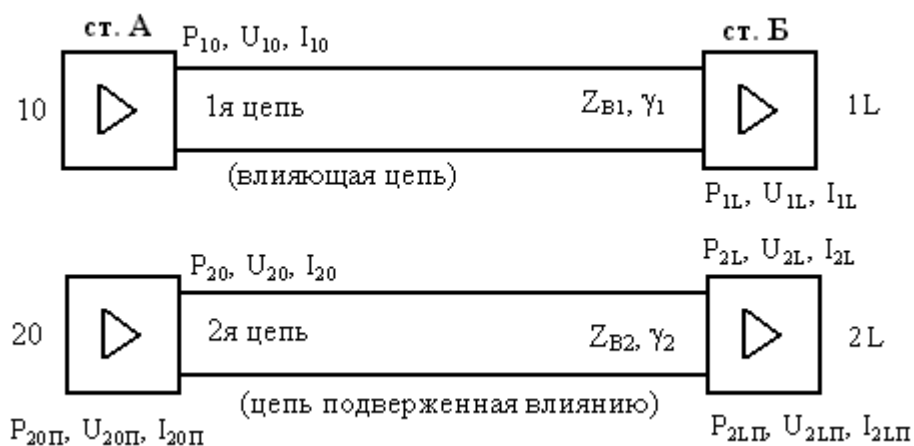
P_{20} -мощность сигнала в начале 2-й цепи.

P_{2L} -мощность сигнала в конце второй цепи.

$P_{20П}$ - помеха на ближнем конце линии.

$P_{2ЛП}$ - помеха в конце второй цепи.

Рассмотрим действие соответствующих токов, напряжений и мощностей на

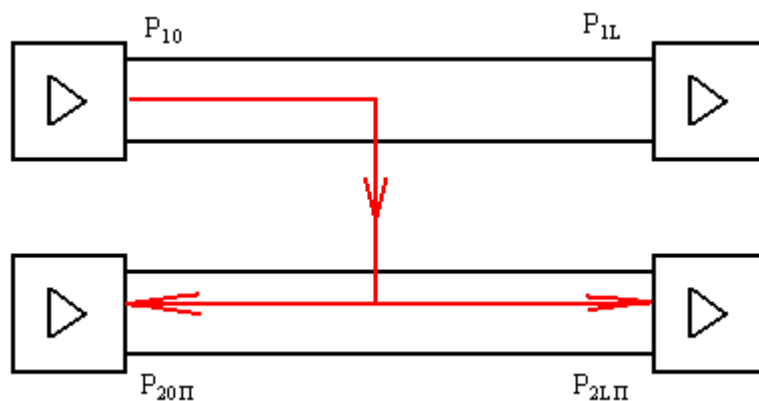


ст. А и ст. Б для взаимно влияющих цепей.

Помеха может иметь очень широкий спектр частот. Однако, количественно удобнее рассматривать действие помехи на определенной частоте, раскладывая помеху на спектральные составляющие:

$$P_{10}(w), P_{1L}(w), P_{20}(w), P_{2L}(w), P_{20П}(w), P_{2LП}(w).$$

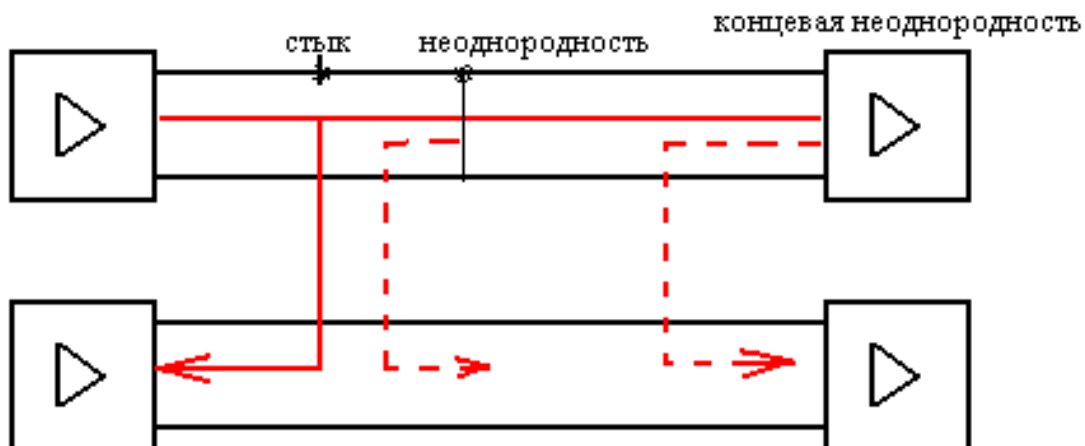
Различают *непосредственные или прямые влияния* – это помехи, индуцируемые непосредственно электромагнитным полем влияющей цепи.



Кроме непосредственных влияний существенную роль могут оказывать косвенные влияния, которые в свою очередь подразделяются на:

- косвенные влияния от отражений
- косвенные влияния через 3-е цепи.

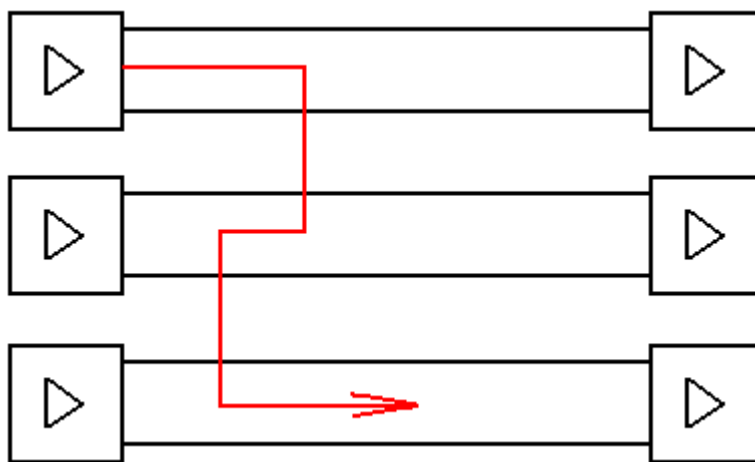
В ряде случаев косвенное влияние может превышать непосредственные влияния между цепями.



Влияние на дальнем конце линии - это влияние определяющееся суммарной мощностью помех непосредственных и косвенных действий на дальнем конце цепи подверженной влиянию.

Взаимные влияния между цепями принято характеризовать не абсолютными, а относительными величинами.

Вводят следующие понятия:



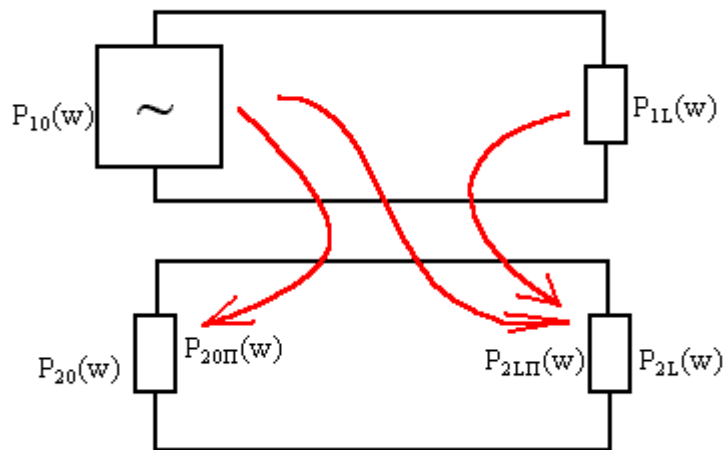
- ✚ *Переходное затухание на частоте ω на ближнем конце линии $A_0(\omega)$.*
- ✚ *Переходное затухание на частоте ω на дальнем конце линии $A_L(\omega)$.*
- ✚ *Защищенность на частоте ω на дальнем конце линии $A_z(\omega)$.*

$$A_0(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{20\ddot{i}}(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{20\ddot{i}}(\omega)} \right|$$

$$A_l(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{2l\ddot{i}}(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{2l\ddot{i}}(\omega)} \right|$$

$$A_z(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{2l}(\omega)}{P_{2l\ddot{i}}(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_{2l}(\omega)}{P_{2l\ddot{i}}(\omega)} \right|$$

Графически переход помех можно представить в виде рисунка:



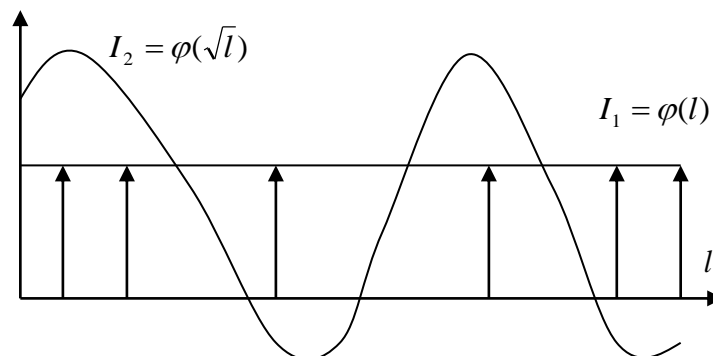
$$A_C(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{\tilde{N}}(\omega)}{P_i(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_{\tilde{N}}(\omega)}{P_i(\omega)} \right|$$

$$A_C(\omega) = P_C(\omega) - P_n(\omega)$$

$$A_e(\omega) = A_C(\omega) + \alpha(\omega)e$$

По характеру влияющего поля и конструкции цепи, подверженной влиянию различают *систематические* и *случайные* влияния.

- ✚ *Систематические* вызываются помехами, законы распределения которых вдоль линии заранее известны. Эти влияния обусловлены взаимным расположением цепей и систематическими погрешностями технологии изготовления кабеля. Это погрешности отклонения диаметров проводников и изоляции от номинальных размеров в заданных технологических условиях.
- ✚ *Случайные* влияния связаны со случайными неоднородностями линии по длине, которые проявляются хаотично и закон изменения которых заранее не известен. Характер изменения таких помех от длины линии при систематических и случайных влияниях имеет вид.



Результирующее электромагнитное влияние между цепями определяется суммой систематической и случайной составляющей.

Для уменьшения взаимных влияний проводится комплекс мероприятий в технологическом цикле изготовления кабеля. Ожесточаются допуски на разброс диаметров жил и изоляции, применяются дополнительные меры по экранированию цепей и их оптимальному взаимному расположению. На симметричных цепях в процессе строительного-монтажных работ выполняется скрещивание цепей, используются контура противосвязи. Все эти мероприятия в процессе строительного-монтажных работ имеют общее назначение **комплекс симметрирования цепей**.

Все указанные меры приводят к уменьшению только систематической составляющей влияния. Случайная составляющая не поддается компенсации, и поэтому является той остаточной составляющей влияния, которая должна поддаваться нормированию после выполнения комплекса симметрирования.

- ✚ **ВЛС** - скрещивание цепей, их оптимальное расположение, уменьшение конструктивных неоднородностей.
- ✚ **СК** – оптимизация конструкции кабеля, шагов скрутки цепей и повивов, экранирование цепей, симметрирование цепей, скрещивание цепей в муфтах, подборы включения контуров противосвязи.
- ✚ **КК** – только технологические меры, связанные с экранированием коаксиальных пар. Возможно так же мера по повышению защищенности за счет увеличения нижней рабочей частоты диапазона, задействованного в системе передачи.
- ✚ **ВОК** – меры по пространственному разделению волокон конструкции оптического кабеля и использованием специальных защитных покрытий.

Лекция №8

Взаимные влияния в НСЭ.

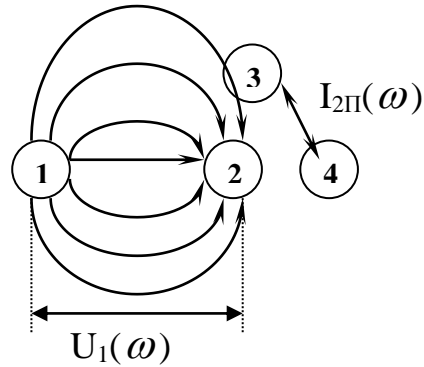
8.1 Взаимные влияния в симметричных цепях связи

Природа и характер взаимных влияний ВСК и в ВЛС одинаковы, поэтому их рассматривают совместно, выделяя существенные особенности.

Как известно в СЦ электромагнитное поле существует на большом расстоянии, оказывая мешающее влияние на соседние цепи. Анализировать воздействие электромагнитного поля удобнее по отдельным составляющим, т.е. по действию магнитного и электрического полей.

Рассмотрим действие электромагнитного поля на соседние цепи.

Вводят такие понятия:



Электрической связью между цепями $k_{12}(j\omega, l)$ называется отношение величины тока помех к величине напряжения в первой цепи, вызывающее этот ток помех.

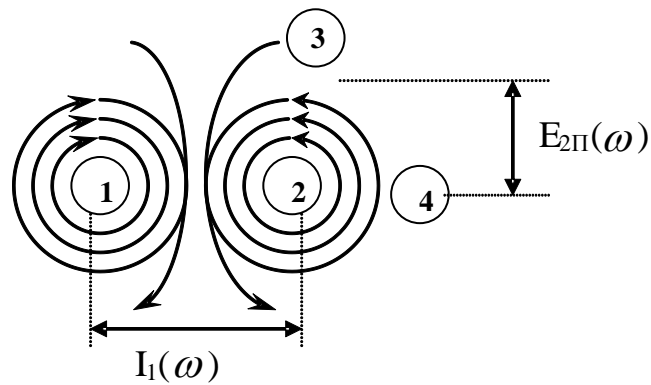
$$k_{12}(j\omega, l) = \frac{I_{2i}(\omega)}{U_1(\omega)} = g_{12} + j\omega k_1 \quad (\tilde{n}\tilde{i})$$

g_{12} – активная составляющая электрической связи, обусловлена асимметрия потерь в изоляции проводников цепей.

k_1 – емкостная реактивная составляющая электрической связи, обусловлена асимметрией частичных емкостей проводников симметричных цепей. Данное соотношение электрической связи справедливо для любых симметричных цепей. Однако для неоднородных цепей вводится понятие коэффициента

электрической связи $k_{12}(j\omega) = \frac{k_{12}(j\omega, l)}{l}, \quad \tilde{N}\tilde{i} / \hat{e}\tilde{i}$

Рассмотрим действие магнитного поля



Вводится понятие *магнитная связь* $M_{12}(j\omega, l)$ – это отношение ЭДС помехи $E_{2\dot{i}}(\omega)$ к току в первой цепи, вызывающего эту помеху.

$$M_{12}(j\omega, l) = \frac{E_{2\dot{i}}(\omega)}{I_1(\omega)} = r_{12} + j\omega m_1 \quad (\tilde{n}\dot{i})$$

r_{12} – активная составляющая магнитной связи обусловленная асимметрией потерь в проводниках на вихревые токи.

m_1 – реактивная составляющая магнитной связи обусловленная асимметрией частичных индуктивностей проводов симметричных цепей.

Для однородных цепей вводится понятие *коэффициент магнитной связи*:

$$M_{12}(j\omega) = \frac{M_{12}(j\omega, l)}{l} \quad (\hat{I}\dot{i} / \hat{e}\dot{i})$$

У электрической и магнитной связи разные размерности, поэтому для совместного рассмотрения действия магнитного и электрического полей их приводят к одной размерности умножая и деля на волновые сопротивления цепей.

Вводится понятие $k'_{12}(\omega)$

$$k'_{12}(\omega) = (g_{12} + j\omega k_1) Z_{B1} Z_{B2} \quad \hat{I}\dot{i}$$

$$M'_{12}(\omega) = \frac{rL_{12} + j\omega m_1}{Z_{B1} Z_{B2}} \quad \tilde{N}\dot{i}$$

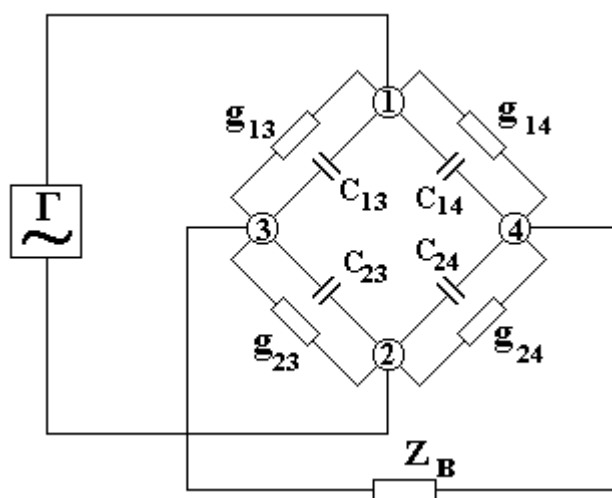
Наиболее удобным является переход к безразмерным значениям электрической и магнитной связи, которая получится при умножении или делении на

$$\sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}$$

$$k_{12}''(\omega) = (g_{12} + j\omega k_1) \sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}$$

$$M_{12}''(\omega) = (r_{12} + j\omega m_1) \frac{1}{\sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}}$$

Рассмотрим эквивалентную схему действия электрической связи. Представим влияющую и подверженную влиянию цепи через мост частичных проводимостей изоляции и частичных емкостей.



Условием баланса моста является равенство нулю суммы частичных проводимостей изоляции и емкостей противоположных плеч моста.

$$(C_{13} + C_{24}) - (C_{23} + C_{14}) = 0$$

$$(g_{13} + g_{24}) - (g_{23} + g_{14}) = 0$$

$$k_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{23} + C_{14})$$

$$g_{12} = (g_{13} + g_{24}) - (g_{23} + g_{14})$$

Чем больше разбаланс емкостей, тем больше k_1 . Чем больше разбаланс асимметрии активной составляющей, тем больше g .

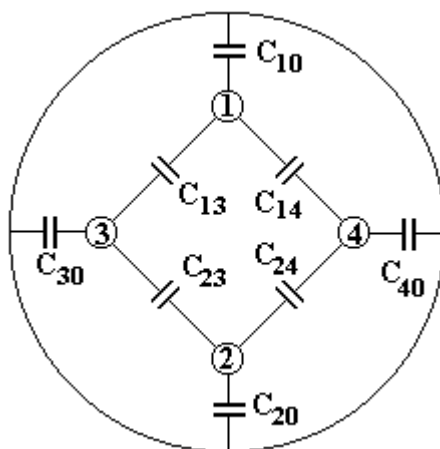
С учетом того, что ёмкостные связи существуют не только между проводниками цепи необходимо учитывать не только реактивную составляющую k_1 , но и k_2 и k_3 , которые характеризуют асимметрию ёмкостей относительно искусственной или фантомной цепи.

$$\text{И/Ш} \quad k_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{23} + C_{14})$$

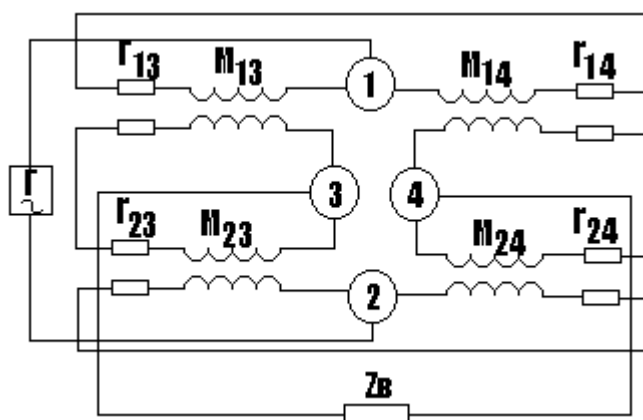
$$\text{И/иск} \quad k_2 = (C_{13} + C_{14}) - (C_{23} + C_{24})$$

$$\text{Ш/иск } k_3 = (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24})$$

$$C_{10} = C_{20} = C_{30} = C_{40} - \text{баланс моста.}$$



Для магнитной связи тоже можно составить мост частичных потерь на вихревые токи и частичных индуктивностей проводников влияющей и подверженной влиянию цепей.



Условие баланса:
 $M_{13} + M_{24} = m_{24} + m_{23}.$

Степень разбалансировки моста:
 $m_1 = (m_{13} + m_{24}) - (m_{14} + m_{23}).$

Степень разбалансировки моста по вихревым токам

$$r_{12} = (r_{13} + r_{24}) - (r_{14} + r_{23})$$

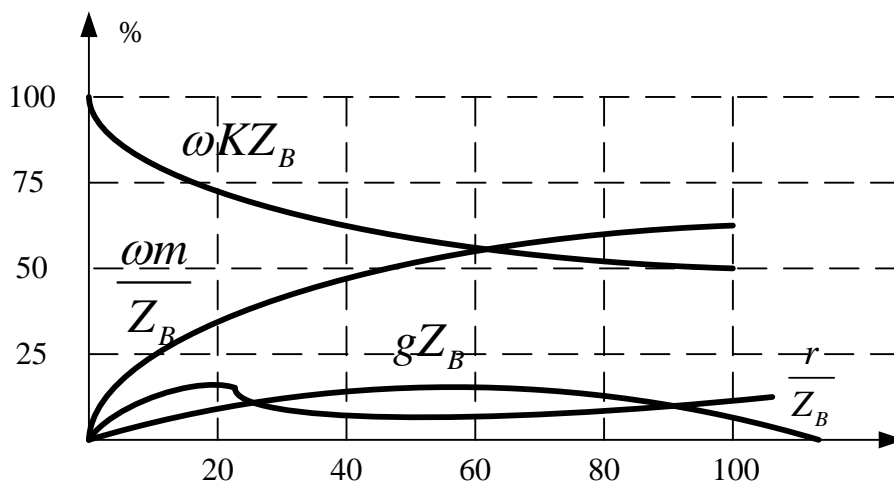
$M_{12}(i \omega) = r_{12} + i \omega m_1$ – коэффициент магнитной связи.

$K_{12}(i \omega) = g_{12} + i \omega k_1$ – коэффициент электрической связи.

r_{12}, g_{12}, m_1, k_1 – первичные параметры влияния симметричной цепи.

Первичные параметры влияния в строительных длинах симметричных кабелей.

В общем случае необходимо учитывать все 4 параметра. Их соотношение и значимость меняется в зависимости от частоты.



Выводы:

- ✚ В области частот, соответствующих симметричным низкочастотным кабелям (0- 10кГц), активные составляющие r_{12} , g_{12} по сравнению с ёмкостной составляющей K_1 . Индуктивная составляющая M в этом диапазоне также мала. Поэтому в НЧ симметричных кабелях нормируют и учитывают только ёмкостную составляющую K_1 , а остальными составляющими пренебрегают.
- ✚ С возрастанием частоты возрастает магнитная связь и, начиная с 30 кГц, электрическая и магнитная связи становятся соизмеримыми. При том наблюдаются следующие соотношения: $g_{12}=(0.1\dots 0.15)\omega K_1$
 $r_{12}=(0.2\dots 0.4)\omega m_1$ на ВЧ кабелях.
- ✚ Связь между ёмкостными и магнитными составляющими: $m_1/K_1=Z_B^2$.

В ВЧ симметричных кабелях на частоте больше 10 кГц необходимо учитывать полную электромагнитную связь, то есть все 4 первичных параметра влияния. При этом электромагнитная связь представляет собой вектор на комплексной плоскости, определяющей суммарное действие помех с учётом амплитуды и фазы. Строительные длины симметричных кабелей обычно составляют 850м. И при использование таких кабелей с ВЧ системами передачи не выполняется условие: $l_{сд} < \lambda/4$. Это делает невозможным раздельное изменение электрического и магнитного поля на рабочей частоте, так как для изменения коэффициента электрической связи во влияющей цепи необходимо обеспечить

режим холостого хода, а при изменении коэффициента магнитной связи во влияющей цепи необходимо обеспечить режим короткого замыкания. Для выполнения условия $I_{сд} < \pi/4$ независимо от режима в конце влияющей цепи (холостой ход или короткое замыкание) цепь должна быть нагружена на волновое сопротивление. Тест первичные параметры влияния на строительной длине и более измерить невозможно. На строительной длине можно измерить только коэффициент электрической связи K_1 , так как ёмкость от частоты не зависит. Поэтому кроме коэффициента ёмкостной связи основными нормируемыми параметрами взаимных влияний являются **вторичные параметры влияния** $A_0(\omega)$, $A_i(\omega)$, $A_3(\omega)$.

В симметричных кабельных цепях изменение фазы влияющего тока помех происходит случайным образом. Поэтому учитываются среднеквадратические значения токов помех, которые суммируются с отдельных строительных длин, составляющих линию.

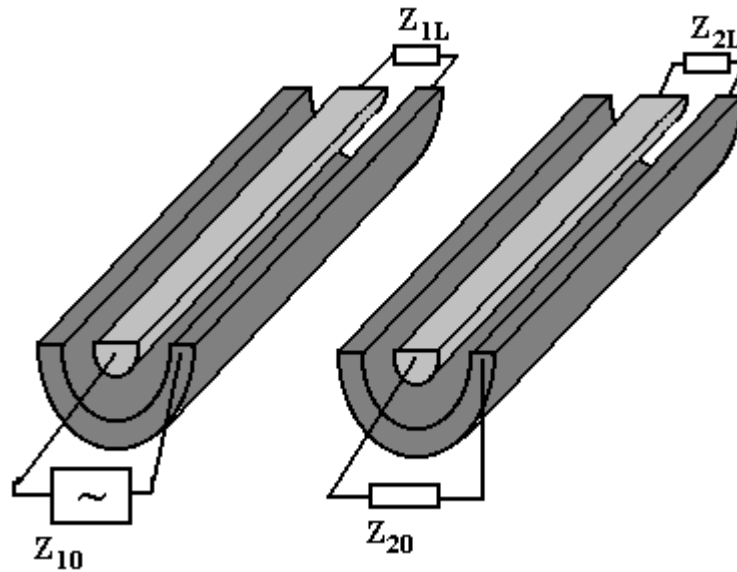
Для ВЛС можно определить изменение фазы помех по всей длине линии. Таким образом, для СК основным параметром передачи является α , а для ВЛС γ ($\gamma = \alpha + i\beta$).

$$I_{\ddot{i}} = \sqrt{\left| I_{1\ddot{n}.\ddot{a}.\ddot{i}}^2 \right| + \left| I_{2.c.\ddot{a}.\ddot{i}}^2 \right| + \left| I_{3.c.\ddot{a}.\ddot{i}}^2 \right| + \dots}$$

8.2 Взаимные влияния в коаксиальных цепях

КЦ идеальной конструкции не имеют внешнего электромагнитного поля, и находящиеся рядом КЦ идеальной конструкции не влияют друг на друга. В действительности КЦ подвержены взаимному влиянию из-за появления продольной составляющей электрического поля на поверхности внешнего проводника $E_Z = E_C = U_C$. Эта составляющая возникает в следствии неидеальной проводимости материала внешнего проводника, т.е. при протекании рабочего тока по внешнему проводнику возникает падение напряжения на внешней поверхности внешнего проводника.

Рассмотрим схему взаимного влияния двух коаксиальных пар.



Выводы:

Между КЦ отсутствуют непосредственные влияния, и действует только косвенное влияние через третью цепь образованную внешними проводниками коаксиальных пар.

Между КЦ отсутствует электрическая связь, действующая в симметричной цепи, и существует только магнитная связь за счет взаимодействия внешних проводников коаксиальных пар.

В следствие отсутствия электрической составляющей взаимных влияний не будет взаимокompенсации взаимных помех на дальнем конце линии от электрической и магнитной составляющей.

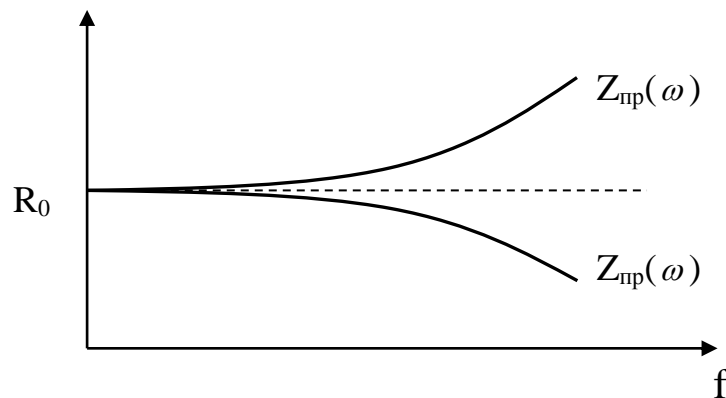
Чем больше действующее напряжение на поверхности внешнего проводника влияющей цепи, тем больше будет ИП. За счет эффекта самоэкранирования, с ростом частоты уменьшается EZ на поверхности внешнего проводника, следовательно, уменьшается взаимное влияние.

В отличии от симметричных цепей в КЦ с ростом частоты помехозащищенность увеличивается, а взаимное влияние уменьшается.

На очень высоких частотах EZ на поверхности внешнего проводника стремится к нулю. При этом влияние между цепями зависит от конструкции внешних проводников, их взаимного расположения, а также материала внешних проводников. Чем дальше расположены коаксиальные пары друг от друга, чем толще внешний проводник, и выше его проводимость тем меньше взаимные влияния.

Увеличение диаметра внешнего проводника приводит к повышенному расходу дефицитной меди, а удаление коаксиальных пар друг от друга к увеличению конструктивных размеров КК. Поэтому в реальных конструкциях коаксиальных пар на поверхности внешнего проводника размещают 2 стальные ленты, обладающие повышенной магнитной проницаемостью. В следствие этого возрастает действие вихревых токов к эффекту самоэкранирования и уменьшению составляющей EZ.

Количественно влияние одной цепи на другую оценивается первичным параметром влияния коаксиальных цепей, который называется сопротивлением связи.



$$Z_{12}(w) = \frac{U_c(w)}{I_1(w)} = \frac{E_Z^2(w)}{I_1(w)} \quad \text{Ом}$$

$Z_{\text{пр}}(w)$ – полное продольное сопротивление цепи.

t - толщина внешнего проводника.

k - коэффициент вихревых токов.

σ - удельная проводимость внешнего проводника.

$$Z_{12}(w) = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_b R_c}} \frac{\sqrt{jk}}{\sigma \operatorname{sh}\sqrt{jkt}}$$

$$M_{12}^{kk}(w) = \frac{Z_{12}(w)Z_{21}(w)}{Z_{13}(w)} = \frac{Z_{12}(w)Z_{21}(w)}{Z_{11}(w) + Z_{22}(w) + jwL_3}$$

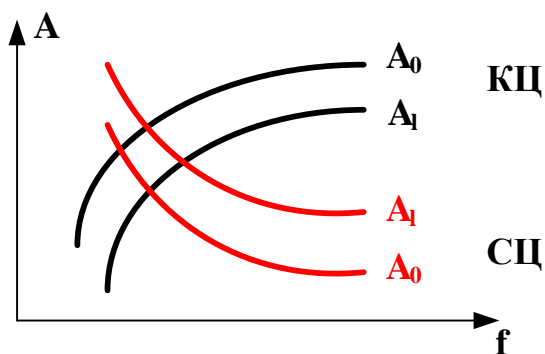
Определяя через магнитную связь для тока помех во 2й цепи можно перейти ко вторичным параметрам влияния.

$$A_0(w) = 20\lg \left| \frac{I_{10}(w)}{I_{20\Pi}(w)} \right| = 20\lg \left| \frac{4Z_3(w)Z_B(w)}{Z_{12}^2(w)(1 - \exp(-2\gamma l))} \right|$$

$$A_l(w) = 20\lg \left| \frac{2Z_3(w)Z_B(w)e^{\gamma l}}{Z_{12}^2(w)l} \right| = 20\lg \left| \frac{2Z_3(w)Z_B(w)}{Z_{12}^2(w)l} \right| + \alpha(w)l \quad \text{дБ}$$

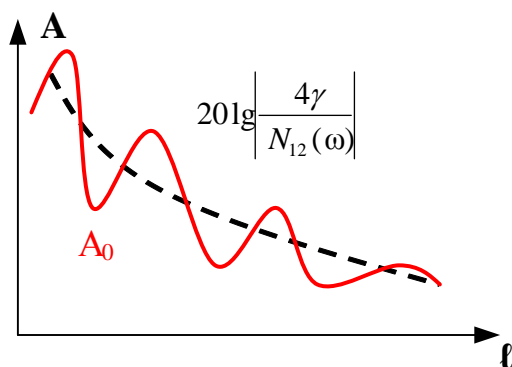
Зависимость вторичных параметров влияния симметричной и коаксиальной цепи от частоты и длины линии.

В симметричной цепи с ростом частоты вторичные параметры уменьшаются, а в коаксиальной цепи наоборот возрастают.



Так как в коаксиальной цепи отсутствует взаимокомпенсация электрических и магнитных помех на дальнем конце, то $A_1 < A_0$.

В СЦ за счет взаимокомпенсации помех на дальнем конце от электрической и магнитной составляющей, то $A_1 > A_0$.

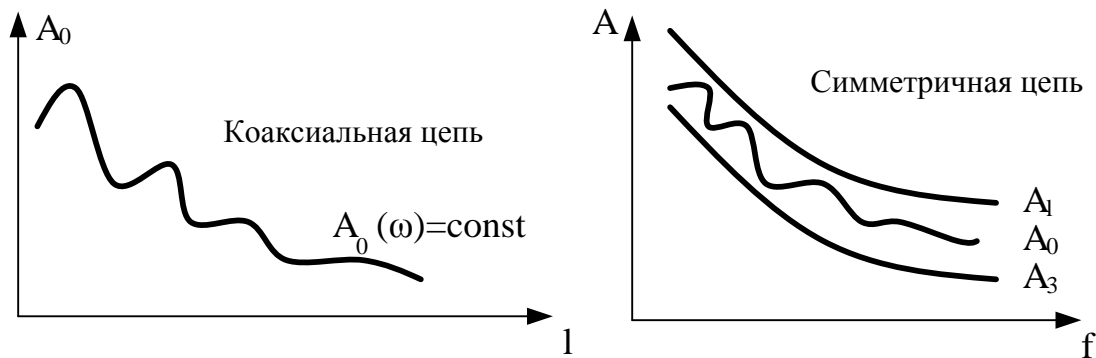


Особенностью частотной зависимости A_0 является колебательно асимптотический характер кривой, особенно на низких частотах.

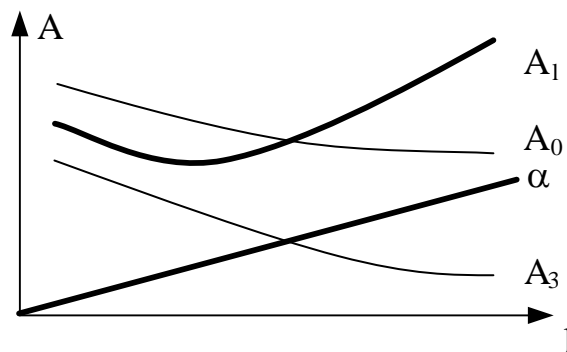
Это обусловлено тем, что помеха приходит на ближний конец 2й цепи с разными фазами в зависимости от частоты и длины волны, что приводит к волнообразному характеру изменения A_0 . Аналогичный характер будет и для длины линии.

В зависимости от длины линии приходящие токи помех будут иметь разную фазу, а значит и A_0 будет иметь волнообразный характер, особенно в начале графика.

Защищенность с возрастанием длины линии уменьшается из-за суммирования токов помех с каждого участка линии. Чем длиннее линия, тем больше действуют помехи, тем меньше защищенность.



Независимо от того СЦ или КЦ графики вторичных параметров от длины линии



8.3 Взаимные влияния в волоконно-оптических кабелях.

Взаимные влияния между ОВ ВОК обусловлены следующими причинами:
за счет взаимодействия электромагнитных полей соседних оптических волокон;
взаимодействие отраженных от неоднородностей световых сигналов соседних оптических волокон;
взаимодействие электромагнитных волн излучаемых при макро- и микроизгибах оптических волокон в структуре оптического кабеля.
Конструктивно в оптических волокнах эти факторы учтены, поэтому диаметр сердцевины ОВ намного меньше диаметра оболочки, а свыше 90% всей энергии распространяется по сердцевине, кроме того оптические волокна имеют слабо прозрачные защитные покрытия, препятствующие выходу света за пределы ОВ, причем с возрастанием длины волны, передаваемой по ОВ, а также с уменьшением радиуса сердцевины глубина проникновения света в оболочку возрастает. Существенную роль играет спектральный состав источника излучения. Чем шире спектр излучения, тем большая часть энергии переходит в оболочку и влияет на соседние ОВ, поэтому лазерный диод предпочтительней.
Вторичные параметры влияния в ОК в общем виде записываются как и для электрических кабелей связи, подробные аналитические выражения для ОК в силу сложности процессов взаимодействия ОВ получить не удастся, поэтому в основе оценки взаимных влияний лежат экспериментальные исследования с использованием измерительных приборов, позволяющих оценивать уровни

сигнала и помехи. Теоретические исследования идут с помощью ЭВМ, это позволило получить приемлемые значения по погрешности. Для практики достаточно пространственного разделения ОВ между собой для получения приемлемых значений по помехозащищенности.

8.4 Нормирование параметров взаимных влияний

Для электрических кабелей связи (ЭКС) нормирование осуществляется по технологическим и сдаточным параметрам.

Технологические параметры- исходные компоненты линий (диаметры проводников, толщина изоляции, первичные параметры влияний, неоднородности по длине линии). Сдаточные – результирующее значение уровня взаимных влияний на длине ЭКУ. Основными сдаточными параметрами будут: значения переходных затуханий на ближнем и дальнем конце линии.

Для симметричных цепей в основу нормирования положена длина ЭКУ наиболее распространенной в свое время системы К-60П. Для нее $l_{\text{ЭКУ}}=20\text{км}$. На эту длину нормируются сдаточные параметры симметричных цепей. Так как для коаксиальных цепей существуют только технологические меры повышения помехозащищенности (экранирование) в процессе строительства и монтажа коаксиальных линий повысить помехозащищенность за счет строительно-монтажных мер не удастся, значит для КЦ сдаточные параметры нормируются на строительную длину 0,5км.

Для ЦСП сдаточные параметры нормируются на полутактовой частоте, так как наибольшая часть энергии передается в области полу тактовых частот на длине ЭКУ (независимо от цепи: СЦ или КЦ). Для большинства ЦСП АЗ нормируется в пределах от 12 до 40 дБ в зависимости от канальности СП.

ИКМ-480 12 дБ

ИКМ-120 27 дБ

ИКМ-30 40 дБ

Нормы на параметры взаимных влияний для СЦ:

$A_{3,yy}=73,8$ дБ

$A_{lyy}=73,8+\alpha l$

Для двухпроводных схем организации связи нормы линии жесткие:

$$A_{3,l}^{yy} \geq 60,8 \text{ дБ}$$

$$A_{0,l}^{yy} \geq 73,8 + \alpha l$$

Нормы на параметры взаимных влияний для КЦ:

$$A_3^{c.d.} \geq 110 \text{ дБ (140 дБ)}$$

$$A_3^{c.d.} \geq 90,3 \text{ дБ (108,6 дБ)} - \text{малогабаритные}$$

$$A_l = A_3^{c.d.} + \alpha l$$

Если нормы не выполняются, то для КЦ остается лишь один фактор повышения помехозащищенности – изменение рабочей полосы частот.

Для повышения помехозащищенности симметричных кабельных цепей используется комплекс мероприятий называемый симметрированием.

Лекция №9

Внешние влияния на НСЭ

9.1 Источники внешних электромагнитных влияний. Опасные и мешающие влияния на цепи связи.

Особенностью внешних источников влияний является их значительное удаление от ЛС по сравнению с источниками взаимных влияний и большая интенсивность воздействующего электромагнитного поля на сравнительно небольшой участок ЛС. По степени опасности внешних влияний все источники подразделяются:

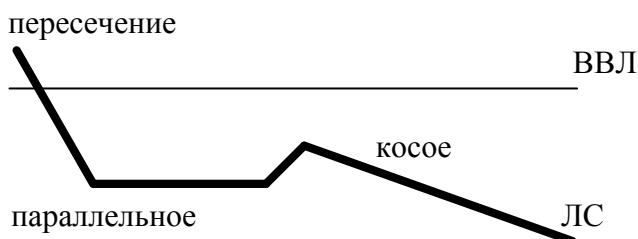
- ⚡ опасные
- ⚡ мешающие

Если под действием внешнего источника в ЛС возникает напряжение более 36 В, которое может привести к повреждению ЛС и поражению током обслуживающего персонала, то такие источники называются опасными.

Если в линии связи наводят напряжение менее 36 В, то они проявляют себя в виде помех, ухудшающих качество связи. Такие источники – мешающие.

В обоих случаях внешние источники могут оказать Электрическое, магнитное, гальваническое влияния. Рассмотрим опасное влияние ЛЭП, при этом существенную роль будет играть ЛЭП и ЛС.

$$a_3 = \sqrt{a_1 a_2}$$



С помощью монограмм находят величину магнитной связи M_{12} . Далее рассчитывают величину ЭДС, наведенной в ЛС.

$$E = w m_{12} I_1 l S,$$

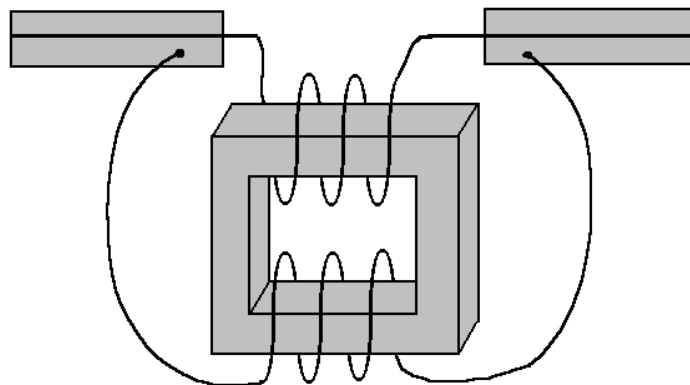
$$E = w \sum_{i=1} I_{pi} l_i S_i m_{12i}$$

$$S = S_{об} S_{тр} S_p S_M$$

Рассчитанное значение ЭДС сравнивают с допустимым значением U между жилой и оболочкой кабеля. Должно выполняться условие:

$$E_{дон} > E_{об} - \text{не требуется дополнительных мер защиты.}$$

В качестве мер защиты могут использоваться дополнительные металлические тросы, кабели с улучшенными экранируемыми свойствами, индукционные трансформаторы, включенные в цепь кабеля.



Трансформатор усиливает магнитную связь между сердечником и оболочкой за счет чего повышается экранировка продольными токами. Это уменьшает коэффициент защитного действия до значения менее 0,1.

Их недостаток это большая материалоемкость.

Разряды молний попадая в трассу кабельной линии приводят к разрушению кабеля.

Молнии:

$$U=(100\dots1000) \text{ МВ}$$

$$I=10000\dots200000 \text{ А}$$

$$t=5\dots100 \text{ мкс}$$

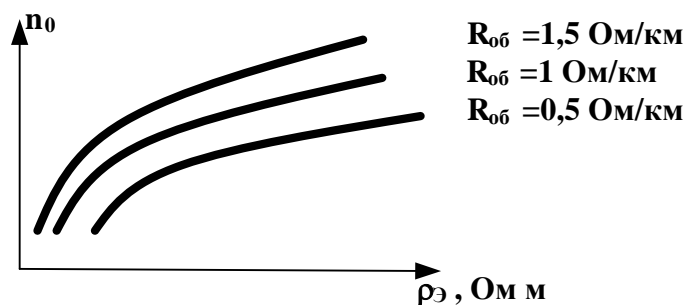
$$n=1\dots30$$

$$T=0,3\dots0,5 \text{ с}$$

$$d_{\text{кан}} = 3 \dots 60 \text{ см}$$

Очевидно, что прямой удар молнии не выдержит ни один кабель. Даже близкие разряды молнии приводят к повреждению кабеля за счет втекания тока молнии в оболочку, т.е. по закону Ома ток будет стремиться по пути наименьшего сопротивления, а у кабеля сопротивление меньше чем у грунта.

Вероятность повреждения кабеля.

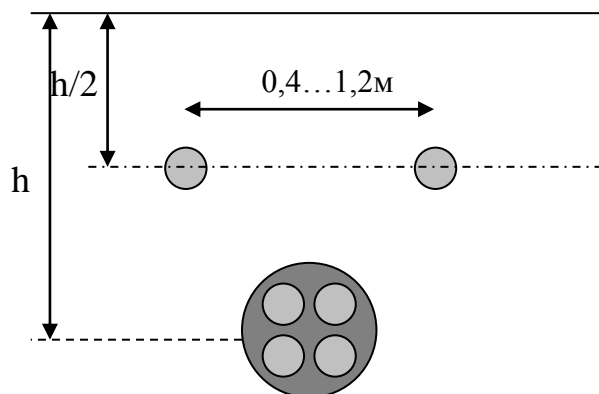


Чем выше удельное сопротивление грунта и сопротивление оболочки, тем меньше вероятное число повреждений.

Существуют нормы на допустимое число повреждений кабеля в год на 100км трассы:

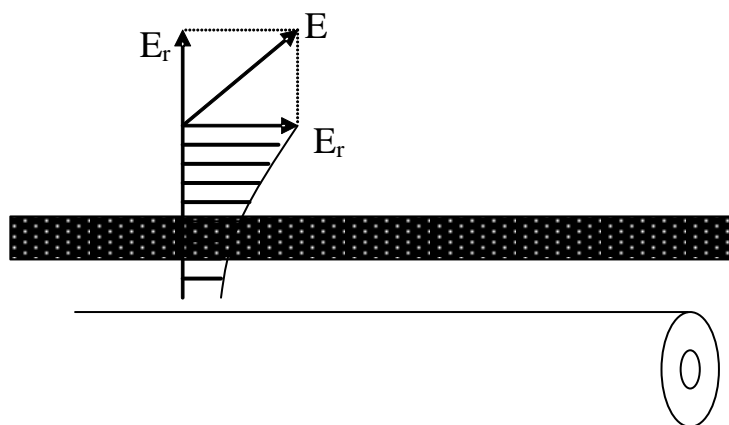
Кабель	$\rho_{\text{Э}} > 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_{\text{Э}} < 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
1x4 КК	0,2	0,3
4x4	0,1	0,2
7x4		

Методы защиты:



Прокладка защитных тросов на $\frac{1}{2}$ глубины кабеля (1 или 2 троса).

Рассмотрим механизм мешающих влияний на кабель связи.



$$E_r = \frac{E_B}{\sqrt{60\lambda\sigma}} \text{ мВ/м}$$

Суммарное мешающее влияние от отдельных гармонических составляющих источника мешающих влияний оценивается психофизическими напряжениями и токами. Психофизические напряжение и ток представляют собой эквивалентное значение воздействия всех составляющих, переведенное на $f=800\text{Гц}$ и проявляется в том, что идет звуковое давление на ухо человека. Эквивалентное значение тока и напряжения помех определяется по следующим формулам:

$$I_{ЭК} = K_{II} F_I I_1$$

$$U_{ЭК} = K_{IU} F_U U_1$$

$K_{II} = 0,35 \div 1,0$ – определяет условия сближения источника помех и ЛС.

F_{II} – психофизический ток, F_{IU} – психофизическое напряжение.

I_1, U_1 – ток и напряжение 1й гармоники спектра помех.

F_i, F_U – форм-факторы.

Для каждого источника помех существует свой форм-фактор, позволяющий рассчитать психофизическое напряжение и ток по первой гармонике. Нормируется эквивалентное значение напряжение помех, создающее шум в канале связи. Для междугородних линий $U_{ш} < 0,1\text{мВ}$, а для местных линий $1,5\text{мВ}$.

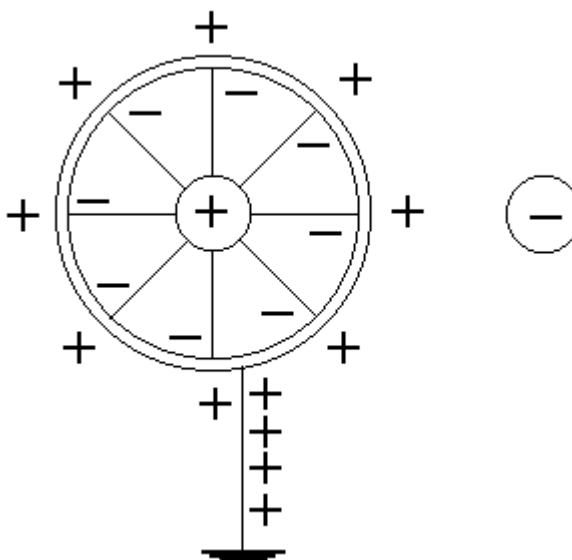
9.2 Меры защиты от внешних влияний. Экранирование кабелей связи

Наиболее радикальным средством уменьшения взаимных влияний и внешних влияний является экранирование отдельных цепей или всего сердечника кабеля в целом ленточными или сплошными металлическими

экранами. В зависимости от частоты помехонесущего поля различают три режима экранирования:

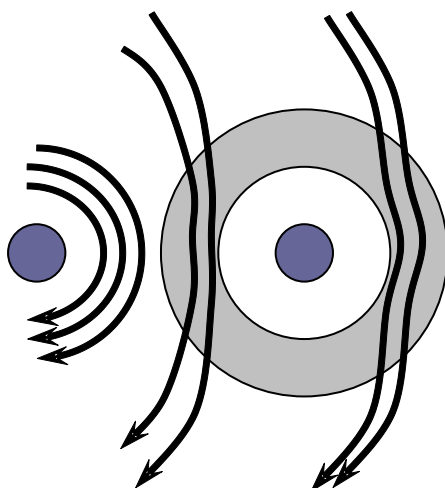
- ✚ Электромагнитостатический, соответствует диапазону частот от 0 до нескольких сотен Гц. В зависимости от действующего поля помех он подразделяется на:
 - ✚ Магнитостатический
 - ✚ Электростатический
- ✚ Электромагнитный, (сотни Гц – сотни МГц), т.е. совпадают с рабочим диапазоном большинства двухпроводных НСЭ, поэтому является наиболее важным.
- ✚ Волновой, (свыше нескольких сотен МГц). В этом режиме длина волны помехи становится соизмеримой с поперечным сечением экрана, поэтому наблюдается резонансное явление, связанное с резкими изменениями параметров экранирования в этом режиме.

Электростатическое экранирование.



Экранирование основано на замыкании электрического поля с поверхности экрана на землю. При этом эффект экранирования не зависит от толщины и вида материала экрана. Важно лишь его хорошее заземление, поэтому такие экраны обычно изготавливаются из тонкой алюминиевой фольги.

Магнитостатическое экранирование.

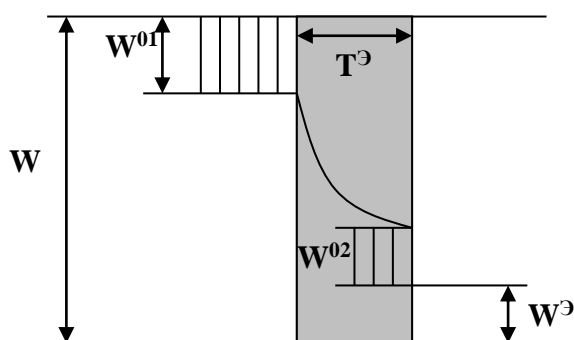


Основано на замыкании магнитного тока помех в толще экрана. Эффективность экранирования в этом случае существенно зависит от толщины экрана и его материала. Лучший эффект дают экраны с большой магнитной проницаемостью (сталь, пермаллой). В данном случае условия заземления не существенны.

Электромагнитное экранирование.

Основано на отражении электромагнитного поля помех от поверхности экрана и поглощении энергии в толще экрана.

Рассмотрим эффект отражения:



$$\mathcal{E} = \frac{W^{\mathcal{E}}}{W} - \text{эффект экранирования.}$$

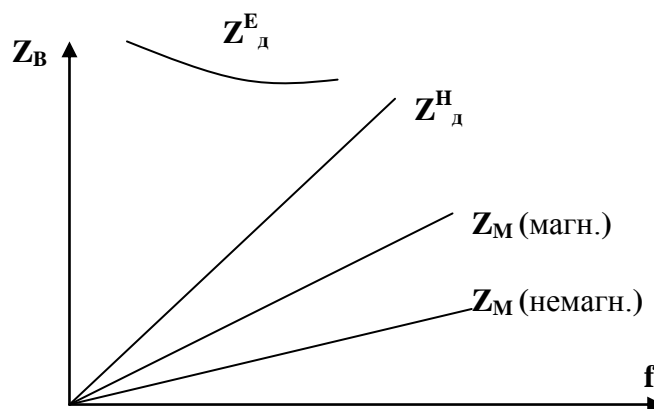
W – энергия помех падающих на экран.

$W^{\mathcal{E}}$ – энергия помех, прошедших через экран

$$S = \frac{H_{\mathcal{E}}}{H} = \frac{E_{\mathcal{E}}}{E} - \text{коэффициент экранирования.}$$

Таким образом, чем больше Z_B диэлектрика отличается от Z_B металла экрана, тем выше эффективность экрана за счет отражения. Рассмотрим графики

изменения Z_B диэлектрика и экрана в зависимости от частоты и вида помехонесущего поля.



$$Z_{\partial}^E = \frac{1}{j\omega \epsilon_a r_{\partial}} \quad Z_{\partial}^H = j\omega \mu_a r_{\partial} \quad Z_M = \sqrt{\frac{j\mu_a \omega}{\sigma}}$$

Наибольшая разность волнового сопротивления у немагнитного экрана и диэлектрика при экранировании электрического поля. Хуже работает на отражение магнитный экран при экранировании магнитного поля. На низких частотах любой экран плохо экранирует магнитное поле за счет отражения.

Для любого помехонесущего поля лучший эффект за счет отражения дает немагнитный экран.

Эффективность экранирования количественно оценивают:

$$S = \frac{E^{\partial}}{E} = \frac{H^{\partial}}{H} \quad \text{— коэффициент экранирования.}$$

Чем меньше S , тем лучше экранирование.

$$A_{\partial} = 20 \lg \left| \frac{1}{S} \right|, \quad \text{дБ — затухание экранирования.}$$

Чем выше A_{∂} тем выше эффект экранирования.

$$S_{KЗД} = \frac{U^{\text{ж}}}{U} \quad \text{— коэффициент защитного действия.}$$

На низких частотах преобладают не поперечные составляющие поля помех E и H , а продольные – индуктированное напряжение на жилах, экранах и оболочках кабеля, поэтому вместо S на низких частотах вводят $S_{KЗД}$.

U – напряжение помехи, индуцированное в оболочке. Чем ниже $U_{\text{ж}}$, тем лучше защитный эффект экрана, тем меньше $S_{KЗД}$.

$$S = S_{OT} + S_{II} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{\partial}}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_{\partial}} \right) th(\sqrt{jkt})} \frac{1}{ch\sqrt{jkt}}$$

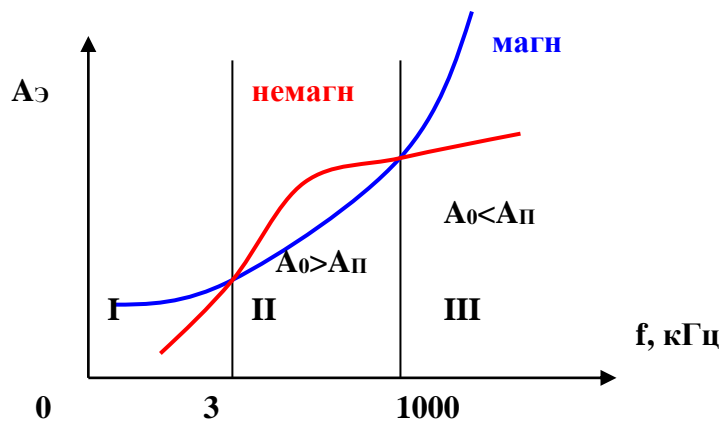
t – толщина экрана

Z_{∂} – волновое сопротивление диэлектрика.

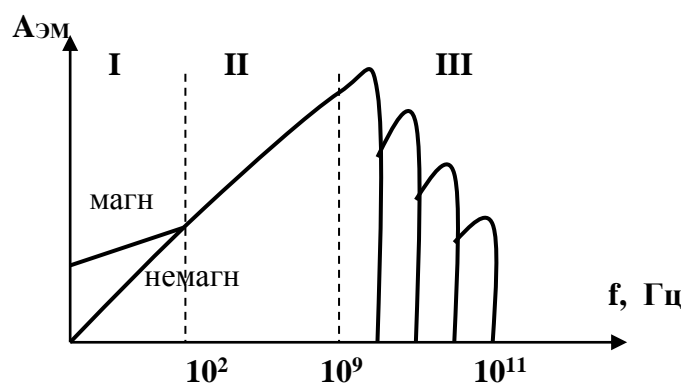
$$A_{\partial} = A_{OT} + A_{II} = 20 \lg \left| 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{\partial}}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_{\partial}} \right) th(\sqrt{jkt}) \right| + 20 \lg |ch\sqrt{jkt}|$$

$$Z_{\partial} = j\omega\mu_a r_{\partial}$$

Рассмотрим изменение параметров экрана для магнитного и немагнитного экранов:

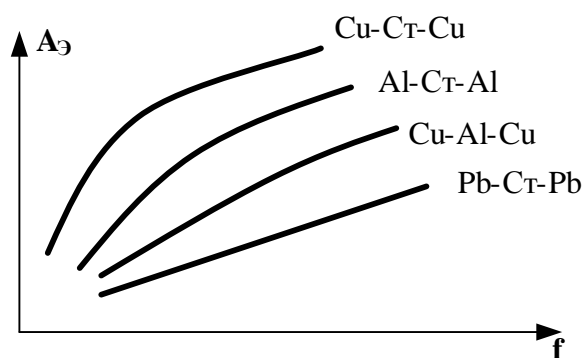


В диапазоне частот симметричных кабелей (до 106Гц) наилучший эффект у немагнитных экранов (медные, алюминиевые). Магнитные экраны лучше, так как выше АП за счет действия вихревых токов. Экраны КК в основном магнитные (стальные). Экранирование магнитного поля менее эффективно экранирования электрического поля, поэтому общую оценку эффективности экранов дают по наихудшему варианту, т.е. при экранировании магнитного поля.



Чем выше частота, тем выше эффективность экранирования. При экранировании в области высоких частот нужно учитывать резонансные явления, которые могут резко ухудшить эффективность экранирования на отдельных частотах, поэтому для обеспечения высокой эффективности экранирования в широком диапазоне частот электромагнитные экраны делают многослойными, чередуя слои из магнитных и немагнитных материалов, разделенных слоями диэлектрика.

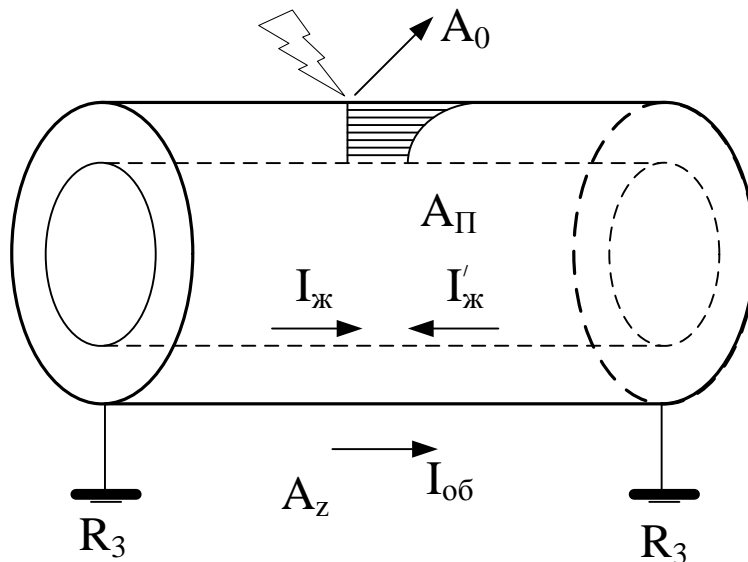
Рассмотрим эффективность многослойных экранов.



Внешние слои экрана делают немагнитными с целью уменьшения интенсивности помехи, действующей на магнитный слой экрана, так как при большой интенсивности помехи идет насыщение магнитного экрана и резко уменьшается его магнитная проницаемость и эффективность.

На низких частотах эффективность экрана за счет отражения и поглощения резко снижается и основную роль начинает играть экранирование за счет 3х цепей.

Принцип экранирования на низких частотах:



Начинают действовать продольные токи помех.

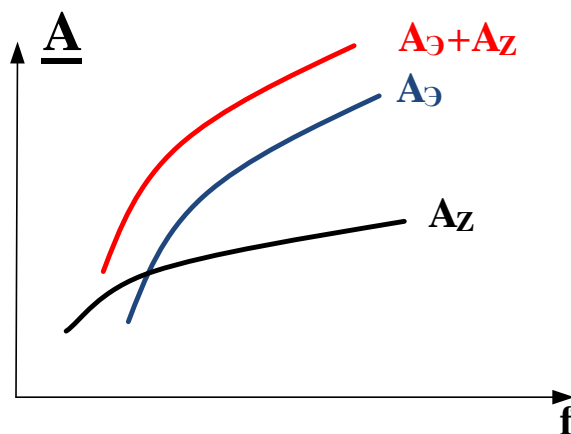
Чем меньше R_3 тем больше $I_{об}$. Под действием $I_{об}$ возникает $E'_{ж}$ и действует $I'_{ж}$.

Результирующий ток: $I_P = I_{жс} - I'_{жс}$

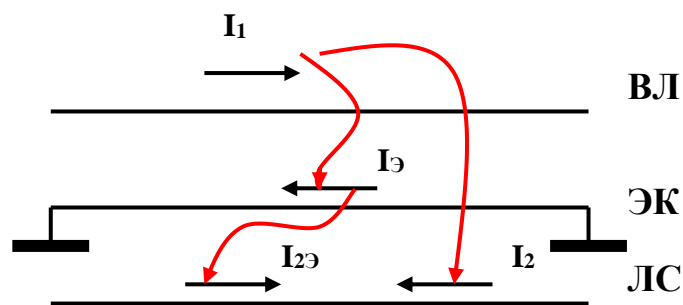
Чем лучше заземлены экран и оболочка, тем при одном и том же индуцированном значении напряжения в оболочке будет больший ток, действующий в оболочке, за счет которого индуцируется напряжение на жиле и действует ток в жиле возрастает эффект экранирования за счет продольных токов.

$$A_z = 20 \lg \left| \frac{I_{жс}}{I_P} \right| = 20 \lg \left| \frac{U_{об}}{U_P} \right|$$

Суммарное действие экранов при экранировании за счет отражения, поглощения, и для продольных токов:



Подобный эффект проявляется при экранирующем действии троса, подвешенного на опорах ЛЭП.



Экраны:

	<p>Сферический</p>
	<p>Цилиндрический</p>
	<p>Плоский</p>

$$S_{пл} : S_{ц} : S_{сф} = 1 : 2 : 3$$

$$A_{\text{Э}}^{пл} = 20 \lg \left| \frac{1}{S^{пл}} \right|, \quad A_{\text{Э}}^{ц} = A_{\text{Э}}^{пл} - 20 \lg 2 = A_{\text{Э}}^{пл} - 6,08 \text{ дБ}$$

Эффективнее всех – плоские экраны, однако на границе граней плоского экрана проявляются эффекты искажения электромагнитного поля и снижение эффективности экрана, поэтому реальные плоские экраны по эффективности близки к цилиндрическим. Технологически удобнее использовать цилиндрические экраны.

Проектирование и строительство линейных сооружений связи

10.1 Общие положения

На современном этапе телекоммуникационные сети в России строятся в основном с использованием волоконно-оптических кабелей связи (ОК). ОК сегодня прокладываются непосредственно в грунт, а также подвешиваются на опорах линий высокого напряжения (ЛЭП), железных дорог и городского электрохозяйства.

С использованием ОК развиваются кабельные сети телевидения, широкополосного абонентского доступа (ШПД), структурированных кабельных систем (СКС).

В условиях интенсивного развития информационных технологии особую актуальность приобретают вопросы проектирования и строительства волоконно-оптических линий передачи.

В этой связи большее влияние в настоящей главе уделено проектированию и строительству волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП). Вопросы проектирования и строительства линий связи с медными кабелями рассматриваются применительно к СКС, где они находят наибольшее применение.

При разработке проектной документации необходимо руководствоваться законодательством и нормативными документами Российской Федерации, постановлениями и решениями Правительства и Министерства связи и информационных технологий, а также иными государственными документами по проектированию и строительству. В соответствии с принятыми нормами, разработкой проектов могут заниматься только предприятия, которые входят в состав саморегулируемых организаций (СРО), на которые начиная с 2010г. возложена организация и проведение строительного контроля (СК) для предприятий строительного комплекса. В России большое количество строительных предприятий вступили в СРО СтройСвязьТелеком, в котором систематизируется работа в области технического регулирования, в том числе и в области строительного контроля при строительстве сооружений связи с учетом общих требованиям к гражданскому строительству.

СК- это обязательная составляющая процесса строительства объектов связи. Без СК в процессе строительства невозможно обеспечить заданное качество и надежность строящегося объекта. Контроль соблюдения проектных решений- это одна из главных задач СК при строительстве сооружений связи. До начала проектирования необходимо выполнить все инженерные изыскания в соответствии с государственными и ведомственными нормативными актами. Для обеспечения надлежащего качества проектирования все проекты по строительству линейных сооружений связи, независимо от источников финансирования, форм собственности и принадлежности, подлежат государственной экспертизе. По поручению заказчика представители

проектных организаций вправе принимать участие в защите разработанной ими проектной документации в экспертных инстанциях. Утверждаются проекты только после получения положительного экспертного заключения.

Проект – это комплексный технико-экономический документ, в котором техническая и экономическая стороны строительства неразрывно связаны. Проект на строительство ВОЛП должен содержать обоснование того, что, где и в какой очередности необходимо строить для сокращения сроков ввода в эксплуатацию объекта и получения наилучших результатов при наименьших затратах.

ВОЛП являются дорогой и сложной частью системы электросвязи. На них приходится до 60...70% от общих капиталовложений на сооружения связи. Поэтому при проектировании ВОЛП особое внимание должно быть обращено на уменьшение удельного веса расходов на строительство и эксплуатацию линии.

Требования и нормы, предъявляемые к ВОЛП, вытекают из принципа построения единой сети электросвязи (ЕСЭ) и генеральной схемы развития связи страны. При этом должны соблюдаться рекомендации и нормы МСЭ-Т на каналы передачи информации.

Основанием для выполнения работ по проектированию является задание на проектирование – техническое задание (ТЗ), которое выдается организацией – заказчиком.

При проектировании ВОЛП учитывают следующие положения.

Последовательность проектирования – от общего к частному. Сначала решаются вопросы обоснования экономической целесообразности и необходимости ВОЛП в целом, а затем осуществляется детализация по отдельным вопросам и устройствам.

Вариантность проектирования. Рассматривается несколько вариантов решений, и на основе технико-экономического анализа выбирается наиболее приемлемый.

Использование типовых проектов. Это существенно снижает стоимость выполнения проекта.

Обоснование целесообразности и необходимости сооружения ВОЛП, выбор наиболее предпочтительного варианта решения осуществляется на основе технико-экономического обоснования (ТЭО). Стоимость строительства на стадии ТЭО определяется по укрупненным показателям. При этом ТЭО разрабатывается на комплекс сооружений ВОЛП в целом (линию, станцию, НРП, аппаратуру и т.п.).

Проект на строительство ВОЛП включает в себя задание на проектирование, технический проект и рабочие чертежи. При двухстадийном проектировании вначале, на первой стадии, разрабатывается технический проект, в котором излагаются все основные технические решения и ТЭО, а после его утверждения, на второй стадии, разрабатываются рабочие чертежи. В случае одностадийного проектирования сразу разрабатывается технорабочий проект, включающий все основные решения технического проекта и рабочие чертежи. На практике в основном используется одностадийное проектирование.

Для обеспечения высокого качества проектной документации необходимо выполнять требования ГОСТ Р 21.1703-2000 [3].

10.2 Задание на проектирование и исходные данные

Основным документом, регулирующим правовые и финансовые отношения, взаимные обязательства и ответственность сторон при разработке проекта, является договор (контракт), заключаемый заказчиком с проектной или проектно-строительной организацией, другими юридическими и физическими лицами, которые имеют лицензию на данный вид деятельности. Неотъемлемой частью договора является задание на проектирование.

Проектная организация – как генеральный проектировщик, а в необходимых случаях и субподрядные специализированные организации (комплексные проекты), вправе принимать вместе с заказчиком участие в разработке задания на проектирование. Задание на проектирование утверждается заказчиком проекта и, в случае необходимости, согласовывается с заинтересованными организациями.

В задании на проектирование ВОЛП в соответствии с [5,6] указываются общие вопросы и основные (объемные) требования. К *общим вопросам* относятся:

- основание на проектирование;
- наименование и назначение проектируемой ВОЛП;
- вид строительства (новое строительство или реконструкция действующей ВОЛП);
- проектная мощность;
- срок начала и окончания строительства;
- источник финансирования;
- заказчик проекта;
- проектная организация, генпроектировщик;
- стадийность проектирования;
- строительно-монтажная организация, генподрядчик;
- режим работы объекта.

Основные (объемные) требования включают:

- состав проектируемого оборудования (может быть указано название оборудования и фирмы, его поставяющей);
- требования по схеме организации связи на проектируемом направлении;
- район, пункт, площадка строительства, помещения для размещения оборудования;
- электроснабжение и электропитание запроектированного оборудования;
- особые условия проектирования (перечень технических вопросов, которые необходимо решить в процессе проектирования);
- требования к архитектурно-строительным решениям (если в проекте предусматривается строительство или реконструкция помещений для размещения оборудования);
- основные технико-экономические показатели проектируемого объекта;
- требования по выполнению требований ГО и СОПМ.

Задание на проектирование подписывается специалистами, принимавшими участие в его составлении, утверждается и скрепляется печатью заказчика.

Приведенный состав задания на проектирование по необходимости может в процессе проектирования уточняться и корректироваться применительно к местным условиям.

Исходными данными для проектирования ВОЛП являются:

- схема организации связи;
- технические характеристики оборудования и кабелей различных производителей, включая оценки их надежности и стоимости;
- требуемая пропускная способность линии передачи, в том числе и на перспективу;
- исходные целевые нормы на цифровые каналы и тракты;
- требуемые показатели надежности ВОЛП в зоне действия оператора связи.

Проект на строительство линейных сооружений состоит из следующих основных разделов:

- общая пояснительная записка;
- линейные сооружения;
- станционные сооружения;
- электротехнические сооружения;
- охрана окружающей среды, охрана труда, техника безопасности, противопожарные мероприятия;
- организация строительства;
- сметная документация.

Общая пояснительная записка (ОПЗ). В ОПЗ перечисляются основные документы, которые являются основанием для разработки проекта. Указывается место проектируемой ВОЛП в магистральной, внутризонавой или местной сети связи, ее мощность, виды передаваемой информации, очередность строительства и состав пусковых комплексов. Дается характеристика трассы проектируемой ВОЛП, размещение промежуточных и конечных пунктов. Приводятся сведения о рассмотренных вариантах выбора трассы и результаты технико-экономического обоснования принятого варианта. Кратко излагаются принятые проектные решения по отдельным разделам проекта.

Линейные сооружения. В этом разделе приводится характеристика трассы ВОЛП с подробным описанием ее участков. Для каждого участка указываются марки и емкость прокладываемых оптических кабелей (ОК), в частности количество модулей, тип и количество оптических волокон (ОВ) в модуле и т.п., технологии его прокладки с детальным описанием методов перехода подземных коммуникаций (например, пересечения автодорог, железных дорог закрытым способом – методом прокола, методом горизонтально-направленного бурения и т.п.).

В разделе по линейным сооружениям приводятся рабочие чертежи с указанием длин кабеля по участкам трассы, прокладываемого разными способами (например, кабелеукладчиком, в кабельной канализации, механизированным способом, вручную и т.п.). На рабочих чертежах

приводятся согласования с организациями, с подземными коммуникациями которых проектируемая кабельная линия имеет пересечения или сближения. На рабочих чертежах делается отметка о необходимости вызова к месту перехода или сближения до начала работ по прокладке кабеля представителей организаций, эксплуатирующих подземные сооружения, с целью уточнения их места прохождения, глубины залегания на местности.

Станционные сооружения. В этом разделе указывается запроектированное оборудование линии передачи и дается обоснование его выбора, рассматриваются меры по увеличению пропускной способности (например, применение оборудования уровня STM-4 с последующей заменой на оборудование уровня STM-16, или же применение системы со спектральным разделением каналов с увеличением по потребности числа используемых оптических несущих). Здесь же разрабатывается схема организации связи, определяется объем оборудования и его размещение, рассматриваются вопросы организации служебной связи, контроля и управления, сигнализации, а также вопросы, специфические для выбранной технологии передачи. Например, вопросы сетевой синхронизации проектируемого участка ВОЛП при использовании оборудования синхронной цифровой иерархии.

Электротехнические сооружения. В данном разделе прорабатываются вопросы электропитания запроектированного оборудования, приводятся результаты расчета потребления электроэнергии, рассматривается возможность использования существующих электропитающих установок на оконечных и промежуточных пунктах ВОЛП. Здесь даются рекомендации по использованию защитного заземления (существующего или проектируемого), излагаются условия обеспечения электробезопасной, пожаробезопасной работы запроектированного оборудования.

Охрана окружающей среды. Принимаемые в проекте решения по защите окружающей среды должны разрабатываться на основе требований законодательных актов по защите окружающей среды, государственных стандартов, строительных норм и правил, а также условий согласований землепользователей, полученных в процессе проведения изысканий. При выборе трассы строительства ВОЛП необходимо учитывать требования Земельного и Лесного кодексов РФ, а также Федерального закона «Об охране окружающей среды» и других нормативных актов. Трассу необходимо согласовывать со всеми землепользователями и утверждать постановлениями Глав администраций районов, по территории которых прокладывается ОК.

После прокладки кабеля должна быть предусмотрена обязательная рекультивация земель сельскохозяйственного и лесного назначения на тех участках, где производится разработка траншей и котлованов экскаватором или ручным способом. В местах возможных размывов грунта на участках, где имеется опасность образования оврагов и эрозии почвы, после прокладки кабеля следует предусмотреть противоэрозионные мероприятия (одерновка траншеи, посадка кустарников, посев трав), способствующие укреплению поверхностного слоя грунта.

Охрана труда, техника безопасности и противопожарные мероприятия. Вопросы охраны труда, техники безопасности и противопожарных мероприятий должны включаться практически во все разделы проекта по строительству ВОЛП.

Все работы по прокладке и монтажу ОК и станционного оборудования должны производиться в соответствии с действующими правилами, инструкциями и документами при строгом соблюдении правил техники безопасности, охраны труда и противопожарных мероприятий.

Перечень правил и руководящих документов по технологии строительства ВОЛП и нормативных документов по охране труда, технике безопасности и противопожарным мероприятиям должен приводиться в соответствующих книгах рабочего проекта.

Охрана труда, техника безопасности и производственная санитария во время строительства ВОЛП должны обеспечиваться мерами, предусмотренными строительной (монтажной) организацией при разработке проекта производства работ (ППР) в соответствии с принятыми в проекте основными проектными решениями, а также с учетом местных условий.

Организация строительства. В этом разделе проекта определяются: - объем работ по линейным, станционным, электротехническим сооружениям, а также другим видам работ;

- продолжительность строительства ВОЛП;
- количество механизированных колонн по прокладке ОК;
- количество бригад по монтажу и измерениям ОК и станционного оборудования, а также другим вспомогательным видам работ.

На основании количества мехколонн и бригад составляется календарный план-график строительства ВОЛП, обосновываются сроки строительства, приводится перечень необходимых для ведения работ машин и механизмов.

Сметная документация. Стоимость строительства проектируемых сооружений определяется ресурсным методом на основе нормативно-сметной базы в уровне текущих цен (сводная и локальные сметы). Основными нормативными и исходными документами для составления сметной документации и определения материальных затрат на строительство ВОЛП являются: методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации, методические указания по определению накладных величин расходов в строительстве, величины сметной прибыли в строительстве и другие нормативные документы, введенные в действие постановлениями Госстроя РФ; порядок определения стоимости строительства, формирования договорных цен по объектам строительства ВОЛП; прайс-листы заводов-изготовителей (фирм) оборудования связи и кабельной продукции и другие нормативные документы.

10.3 Технический надзор за строительством линейных сооружений связи

Технический надзор за строительством, реконструкцией, техническим перевооружением, капитальным ремонтом линейно-кабельных сооружений

производится в течение всего периода строительства и устанавливается с целью осуществления систематического контроля за качеством, технологической последовательностью и точным соответствием выполнения строительно-монтажных работ проектным решениям, руководствам, строительным нормам и правилам, а также для повышения ответственности строительно-монтажных организаций за качество строительства, надежность и долговечность линейных сооружений.

Технический надзор за производством строительно-монтажных работ осуществляется эксплуатационным предприятием на баланс которого подлежат передаче законченные строительством или реконструкцией объекты.

Работники технического надзора являются ответственными представителями заказчика и назначаются приказом заказчика по согласованию с эксплуатационным предприятием. Копия приказа направляется подрядной организации.

Для осуществления технического надзора назначаются высококвалифицированные специалисты, хорошо знающие руководство по строительству и правила технической эксплуатации магистральных и внутризонных кабельных линий передачи и имеющие практический опыт работы.

В приказе должно быть указано: на каких объектах и участках и за какими видами работ осуществляется надзор назначенными специалистами.

Для непосредственного контроля за ходом выполнения конкретных видов работ (прокладка кабеля и подземных защитных проводов, устройство контуров заземления, установка средств и устройств защиты от коррозии, строительство НРП, монтаж кабеля и оконечных устройств, испытание герметичности кабелей, устройство речных переходов, проведение измерений и т.д.) дополнительно должны привлекаться соответствующие специалисты.

Работники технадзора, обязаны изучить проект (трассу прокладки кабеля, места размещения НРП, устройство заземлений, меры защиты кабелей и контейнеров НРП, места пересечений с другими подземными коммуникациями и др.), ознакомиться с конструкцией прокладываемого кабеля, технологией его прокладки и монтажа, объемом и составом измерений и испытаний с установленными нормами и требованиями.

Обеспечение работников технического надзора необходимой проектной документацией осуществляется заказчиком.

Работники технического надзора не вправе вносить какие-либо изменения или санкционировать отступления от проекта и сметы. Такие изменения могут вноситься только в установленном порядке.

Работники технического надзора обязаны постоянно находиться на месте производства работ и вести журнал ежедневного учета проделанной работы.

Информация о выявленных дефектах, отклонениях от норм и нарушениях технологии должна немедленно сообщаться заказчику и руководителю эксплуатационного предприятия.

Заказчик и эксплуатационное предприятие обязаны принимать оперативные меры по устранению выявленных недостатков.

Работники технического надзора с представителями строительно-монтажных организаций освидетельствуют скрытые работы непосредственно после их производства составлением акта по установленной форме, не допуская до оформления этих актов производства дальнейших работ.

Работники технического надзора принимают участие в проверках качества строительства, проводимых при авторском надзоре проектными организациями и следят за своевременным исполнением строительно-монтажными организациями указаний авторского надзора.

При проведении технического надзора работники:

- + Вместе с представителями строительной организации участвуют в осуществлении входного контроля поступающего кабеля, материалов, изделий и оборудования, в составлении и подписании актов-рекламаций на выявленные дефекты;
- + Принимают участие в разбивке трассы кабельной линии в строгом соответствии с рабочими чертежами;
- + Проверяют качество расчистки просек, следят за выполнением работ по планировке трассы, исключая выглубление ножа кабелеукладчика при прокладке кабеля, а также за качеством предварительной пропорки грунта;
- + Следят за правильностью подбора строительных длин для прокладки. В процессе прокладки фиксируют в журнале учёта работ номера барабанов и длину кабелей;
- + При прокладке кабеля глубину его заложения постоянно контролируют и фиксируют в журнале ежедневного учёта работ. В случае мелкого залегания (или выбросов) кабеля требуют немедленного принятия необходимых мер по устранению допущенных недостатков;
- + Не допускают нарушений технологии, которые могут привести к увеличению числа муфт, образованию "петель" и нарушению прямолинейности трассы кабеля; контролируют целостность шланговых защитных покровов. На все дополнительные муфты, "петли" и нарушения прямолинейности трассы совместно с представителями строительной организации составляют акты с указанием причин отклонений от проекта и виновных в них. Акты предъявляются рабочим комиссиям в составе исполнительной документации и учитываются при оценке качества строительных работ;
- + При прокладке кабеля рядом с действующей линией требуют выполнения инструкции по проведению работ в охранных зонах магистральных и внутризональных кабельных линий передачи;
- + Осуществляют контроль за прокладкой кабеля в пластмассовых трубах для ВОЛП в кабельной канализации и грунте;
- + При прокладке защитных проводов (тросов) проверяют соответствие проекту материала и сечения проводов, их число, глубину укладки,

правильность расположения относительно кабеля, способ и качество сращивания проводов;

- ✚ При прокладке кабеля через водоёмы с привлечением водолазных специалистов проверяют: глубину подводной траншеи (до прокладки кабеля), фактическую глубину проложенного кабеля, засыпку траншеи, глубину прокладки кабеля в береговой зоне, выполнение берегоукрепительных работ, правильность установки створных знаков;
- ✚ При устройстве переходов через автомобильные и железные дороги проверяют глубину заложения труб, длину и качество труб, способ и качество заделки стыков, проходимость каналов, заделку концов свободных и занятых каналов;
- ✚ При строительстве кабельной канализации проверяют глубину траншеи, уклон трубопроводов, расположение труб и стыков, способ и качество заделки стыков, проходимость каналов, качество гидроизоляции;
- ✚ При монтаже муфт следят за соблюдением установленной технологии монтажа и проверяют глубину и правильность укладки кабеля и муфт в котлованах;
- ✚ Контролируют соответствие работ по защите линейно-кабельных сооружений от внешних электромагнитных влияний;
- ✚ При установке НРП проверяют правильность устройств фундаментов и креплений, состояние защитных покровов конструкций, качество герметизации вводных патрубков, защиту вводов кабелей и другие работы;
- ✚ Контролируют выполнение правил прокладки кабелей при отрицательных температурах;
- ✚ Следят за полнотой и правильностью выполнения электрических и оптических измерений;
- ✚ Контролируют правильность и достоверность составления исполнительной документации;
- ✚ Ежедневно докладывают руководству предприятий о ходе работ, отклонениях от проекта и возникших разногласиях;
- ✚ По разрешению руководителя эксплуатационного предприятия визируют документы об объёмах выполнения строительства работ.

Основы технической эксплуатации линейных сооружений связи

11.1 Общие положения

Техническое обслуживание линейно-кабельных сооружений является элементом технической эксплуатации и представляет собой комплекс профилактических мероприятий, имеющих целью поддержание в исправности линейно-кабельных сооружений в процессе эксплуатации для обеспечения необходимой степени надежности ЛКС.

Техническое обслуживание ЛКС включает: охранно-предупредительную работу, оперативный контроль за техническим состоянием ЛКС, текущее и планово-профилактическое обслуживание, технический надзор за строительством, реконструкцией и капитальным ремонтом.

Охранно-предупредительная работа

Охранно-предупредительная работа проводится с целью недопущения повреждения ЛКС при производстве работ вблизи или в охранной зоне кабеля и организуется в соответствии с "Правилами охраны линий и сооружений связи Российской Федерации", утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 9 июня 1995 г. № 578.

С целью предупреждения механических повреждений кабелей и сооружений связи при производстве сторонними организациями и землепользователями работ в охранных зонах линий связи эксплуатационные предприятия связи должны выполнять комплекс мероприятий, включающий:

- ✚ Предоставление сведений для регистрации трасс кабельных линий передачи в управлениях (отделах) по делам строительства и архитектуры областных (краевых), республиканских, городских и районных администраций и других органах местного самоуправления;
- ✚ Участие представителей эксплуатационных предприятий связи в работе комиссий по отводу земельных участков в охранных зонах;
- ✚ Нанесение трасс кабельных линий на предъявленные карты и схемы районных комитетов по земельным ресурсам, всех землепользователей (сельскохозяйственных и промышленных предприятий, учреждений, войсковых частей, частных домовладений и др.) по земельным участкам которых проходят кабельные линии;
- ✚ Предоставление сведений для нанесения трасс кабельных линий на схемы, планы и паспорта владельцам других подземных, наземных и надземных коммуникаций, с которыми кабельные линии имеют сближения и пересечения;

- ✚ Представление информации администрации областей (краев), районов о нарушителях "Правил охраны линий и сооружений связи";
- ✚ Охранно-разъяснительную и рекламно-агитационную работу на предприятиях, в организациях производящих работы в охранных зонах кабельных линий, а также с землепользователями и домовладельцами в местах прохождения кабельных линий по выполнению требований "Правил охраны линий и сооружений связи" с вручением предупреждений по форме, приведенной в Приложении Г;
- ✚ Выдачу проектным, строительным и другим организациям, а также частным лицам технических условий (согласовании) на производство земляных работ в охранных зонах кабельных линий;
- ✚ Контроль за реализацией технических условий при выполнении работ в охранных зонах кабельных линий связи;
- ✚ Надзор за трассами кабельных линий в соответствии с графиком обходов и объездов, утвержденный руководителем ТУСМ и постоянный контроль за производством земляных работ вблизи или в охранных зонах кабелей.
- ✚ При каждом случае нарушения "Правил охраны линий и сооружений связи" принятие мер к прекращению работ и составлению акта для представления в административную комиссию исполнительной власти или следственным органам для привлечения виновных к ответственности.
- ✚ Требовать у водителей землеройных механизмов нарядов на производство соответствующих работ вблизи и охранной зоне линии связи с указанием наличия кабелей в месте земляных работ, а у ответственных лиц (прорабов, мастеров и т.д.) письменного разрешения административно-технических инспекций или соответствующих служб районов и согласованного проекта (чертежа). При отсутствии у водителя наряда на производство земляных работ, а у ответственного лица разрешения (ордера) представителем предприятия связи выдаётся предписание о запрете работ, составляется акт о нарушении Правил в охранной зоне кабеля и подаётся сообщение в административно-техническую инспекцию или соответствующую службу о факте выявленных нарушений;
- ✚ Обеспечение гласности решений административных комиссий о наложении штрафов, вынесенных народными судами, приговоров о привлечении к уголовной ответственности виновных в нарушении Правил охраны линий сооружений связи, решений арбитражных судов о возмещении виновными лицами ущерба за восстановление поврежденных линий связи и потери тарифных доходов, не полученных предприятием связи за период прекращения действия связей;
- ✚ Проведение перечисленных и других организационно-технических мероприятий, оформление актов и материалов при повреждении линии и сооружений связи осуществляется в строгом соответствии с

нормативными документами, рекомендациями и указаниями вышестоящих органов

Оперативный контроль технического состояния и технический надзор предусматривает:

- ✚ контроль состояния НРП и НУП по сигналам систем телемеханики, при необходимости, немедленный выезд на трассы кабельных линий для принятия соответствующих мер;
- ✚ контроль содержания кабелей под избыточным воздушным давлением;
- ✚ контрольные осмотры трасс и проверку состояния линейно-кабельных сооружений. Периодичность и маршруты осмотра трасс кабельных линий в зависимости от их назначения, конкретных условий трасс, времени года, наличия земляных работ и т.д. определяется ТУСМ (ЭТУС). Особое внимание должно быть обращено на обеспечение сохранности от механических повреждений -ВОЛП. Если трасса при движении на транспортном средстве не просматривается, то необходим пеший осмотр;
- ✚ надзор за производством работ вблизи или в охранных зонах кабелей.
- ✚ При земляных работах в охранной зоне выезд на трасу производится в зависимости от условий и характера выполняемых работ.

Текущее обслуживание ЛКС является обязательным и должно выполняться систематически.

Текущее обслуживание включает следующие работы:

- ✚ выполнение мероприятий по обеспечению сохранности линейно-кабельных сооружений на предприятиях, в организациях и учреждениях, производящих земляные работы, а также среди землепользователей и землевладельцев;
- ✚ выправка покосившихся, замена неисправных и установка новых знаков обозначения трассы;
- ✚ установка предупредительных знаков в местах производства работ на трассах кабельных линий;
- ✚ устройство защиты линейно-кабельных сооружений от механических повреждений в местах раскопок;
- ✚ расчистка от снега подходов и подъездов к НРП (НУП), отвод талых вод;
- ✚ устранение повреждений и аварий на линейно-кабельных сооружениях;
- ✚ устранение мест негерметичности металлических оболочек кабелей;
- ✚ обслуживание и ремонт средств механизации;
- ✚ обслуживание устройств защиты линейных сооружений от коррозии, ударов молнии, влияния электрифицированных железных дорог и ЛЭП;
- ✚ обслуживание кабельной канализации;
- ✚ обслуживание кабельных переходов через шоссе, железные дороги и водные преграды;

- ✚ содержание в исправном состоянии инвентаря, временных кабельных вставок, аварийного запаса кабеля, инструментов, приборов;
- ✚ внесение, при необходимости, изменений в паспорта кабельных трасс после окончания земляных работ и устранения линейных повреждений.

11.2 Планово-профилактическое обслуживание линейно-кабельных сооружений

Планово-профилактическое обслуживание ЛКС осуществляется периодически в соответствии с планом, утвержденным главным инженером предприятия и включает:

- ✚ измерение электрических и оптических параметров кабельных линий;
- ✚ выполнение работ по защите кабелей от механических повреждений;
- ✚ изготовление предупредительных знаков, замерных столбиков, шлагбаумов и т.д.;
- ✚ контроль глубины залегания кабеля и уточнения картограмм.

Периодичность контроля глубины залегания кабелей и выбор проверяемых участков трассы устанавливается каждым ТЦМС или, по их поручению,

- ✚ подчиненными предприятиями (ТУСМ, ЭТУС);
- ✚ подготовка линейно-кабельных сооружений к работе в зимних условиях и в период паводка.

РЕМОНТ ЛИНЕЙНО-КАБЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ремонт линейно-кабельных сооружений проводится в целях поддержания или восстановления их первоначальных эксплуатационных характеристик. В соответствии с назначением, характером и объемом выполняемых работ ремонт подразделяется на *текущий* и *капитальный*.

Текущий ремонт производится эксплуатационным персоналом периодически в зависимости от состояния ЛКС.

Затраты на текущий ремонт производятся в пределах средств, предусматриваемых сметой затрат на производство.

Оперативный контроль качества работ по текущему ремонту осуществляется руководителем ЦЛКС, ЛТЦ.

Приемка законченного текущего ремонта производится по участкам НРП - НРП комиссией, в составе начальника ЦЛКС (ЛТЦ) и представителей ТУСМ (ЭТУС) и оформляется актом, в котором отмечаются объем и качество выполняемых работ (хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно), недостатки и сроки их устранения, а также оценивается общее состояние линейно-кабельных сооружений на принимаемых участках и даются необходимые рекомендации на следующий ремонтный период.

До начала приемки текущего ремонта комиссии предъявляются утвержденный план текущего ремонта, данные о фактически выполненных объемах работ и протоколы измерений.

При приемке текущего ремонта комиссия выборочно производит непосредственный осмотр не менее 25 % объема выполненных работ. При этом не менее 10 % трассы проверяется пешим осмотром.

При текущем ремонте выполняются следующие основные виды работ:

- ✚ Частичные (одной строительной длины) выноски, замена и углубление подземного кабеля длиной не более 200 м;
- ✚ Планировка и подсыпка грунта при промоинах, оползнях, обвалах, устройство водоотводов и укрепление верхнего покрова грунта;
- ✚ Обследование кабельных переходов, частичные выноски и углубление подводных кабелей без привлечения водолазов и специальной землеройной техники;
- ✚ Замена и ремонт отдельных муфт, восстановление целостности защитных покровов кабеля;
- ✚ Ремонт заземляющих устройств
- ✚ Мелкий ремонт кабельных вводов и кабельных переходов через автомобильные и железнодорожные, а также другие коммуникации;
- ✚ Ремонт и частичная замена устройств по защите кабеля и других линейных сооружений от коррозии и внешних электромагнитных влияний;
- ✚ Устройство и ремонт несложных контуров заземлений;
- ✚ Выполнение несложных работ по защите кабеля и других линейных сооружений от коррозии и внешних электромагнитных влияний
- ✚ Отыскание и устранение отдельных мест негерметичности оболочек кабеля;
- ✚ Мелкий ремонт сооружений подземной кабельной канализации (ремонт или замена отдельных люков, крышек, замков, накладок и др);
- ✚ Установка и замена замерных столбиков, шлагбаумов, предупредительных и указательных знаков и плакатов по трассе кабеля;
- ✚ Ремонт и устройство переездов через трассу кабеля;
- ✚ Уточнение фиксации и глубины залегания кабелей на отдельных участках;
- ✚ Укрепление и замена опор информационных знаков, замена сигнальных фонарей, ламп и другие текущие работы на переходах через водные преграды;
- ✚ Выполнение отдельных работ по ремонту кабеля и его доведение до норм по электрическим и оптическим параметрам на участке НРП-НРП (НУП-НУП);
- ✚ Ремонт сооружений ЦЛКС, ЛТЦ, НРП, (покраска дверей, полов, окон, стен, подсыпка грунта обваловки на НРП с частичной одерновкой, устройство и ремонт дорожек к НРП.

Капитальный ремонт производится периодически в зависимости от технического состояния линейных сооружений и планируется в каждом отдельном случае на основании данных контрольных технических осмотров, периодических проверок и дефектных ведомостей.

При капитальном ремонте одновременно выполняются все работы, относящиеся к текущему ремонту.

Капитальный ремонт линейных сооружений производится по отдельным проектам, сметам и нормативам хозяйственным или подрядным способом.

Приемка выполненных работ по плану капитального ремонта производится комиссией, назначаемой руководством предприятия.

При капитальном ремонте выполняются следующие основные виды работ:

- ✚ Выноска или углубление кабеля (более одной строительной длины) длиной более 200 м;
- ✚ Подводные, берегоукрепительные и земляные работы на речных переходах и в прибрежных зонах подводных линий передачи; подводно-технические работы по обслуживанию и ремонту кабельных речных переходов с привлечением водолазов;
- ✚ Ремонт кабельной канализации, переустройство кабельных колодцев, устройство компенсаторов для защиты кабелей от сдавливания льдом; приведение электрических и оптических характеристик кабеля к установленным нормам на всей длине кабельной магистрали или на секции между оконечным и обслуживаемыми усилительными пунктами;
- ✚ Работы на существующих кабельных линиях с целью использования их в более широком спектре частот;
- ✚ Проведение мероприятий по защите кабеля от различных видов коррозии, ударов молнии, влияния линий электропередачи, электрифицированных железных дорог и радиостанций;
- ✚ Замена и установка боксов, кабельных ящиков, киосков, шкафов, катушек индуктивности;
- ✚ Замена кабелей (более строительной длины) и оборудования, несоответствующих предъявляемым к ним требованиям, на новые.
- ✚ Большие объёмы работ по подсыпке грунта в местах промоин, оползней, обвалов и т.д.;
- ✚ Устройство сложных контуров заземлений;
- ✚ Большие объёмы работ по перемонтажу муфт и восстановлению целостности защитных покровов кабеля;
- ✚ Установка над муфтами пассивных контуров (маркеров) в местах выноски замерных столбиков с пахотных земель;
- ✚ Устройство переходов через реки, автомобильные и железные дороги;
- ✚ Большие объёмы работ по восстановлению герметичности оболочки кабелей;

- ✚ Ремонт сооружений ЦЛКС и ЛТЦ, замена наземных сооружений НРП и НУП.

Основные объёмы текущего и капитального ремонтов определяются планами работы на год.

На основе годовых планов составляются уточненные квартальные и месячные планы, учитывающие результаты текущих контрольных проверок и технических осмотров.

Для проведения ремонтных и аварийно-восстановительных работ в полевых условиях должна быть применена измерительно-монтажная машина. Машина должна использоваться для измерения кабеля и монтажа муфт.

Для ремонта оптических кабелей в состав оборудования измерительно-монтажной машины должны входить:

- ✚ приборы для определения места повреждения (обрыва) волоконно-оптического кабеля;
- ✚ измеритель оптической мощности, измеритель затухания, рефлектометр оптический;
- ✚ измеритель коэффициента ошибок полевой;
- ✚ комплект специального инструмента для разделки и монтажа оптических волокон;
- ✚ полевой сварочный аппарат для сварки волокон, источники электроснабжения;
- ✚ кабельные изделия и материалы, монтажный инструмент;
- ✚ радиостанции и аппараты служебной связи.

АВАРИЙНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

К аварийно-восстановительным работам относятся работы, проводимые с целью оперативного восстановления работоспособности поврежденной кабельной линии.

Продолжительность аварийно-восстановительных работ исчисляется с момента полного или частичного прекращения действия связи до восстановления способности поврежденной кабельной линии обеспечивать передачу всех задействованных на данное время линейных трактов.

Аварийно-восстановительные работы должны проводиться в контрольные, предусмотренные технологическими картами сроки с учетом погодных и других условий.

Технологические карты составляют ТУСМ или отделения ТЦМС, ЭТУС и утверждаются ТЦМС. Карты должны разрабатываться с учетом конкретных условий и должны быть направлены на сокращение продолжительности простоев каналов связи и длительности устранения линейных повреждений.

Аварийно-восстановительные работы проводятся силами цехов линейно-кабельных сооружений (ЦЛКС) и линейно-технических цехов (ЛТЦ), а также

РВБ ТУСМ, ЭТУС. Непосредственное руководство работами осуществляет начальник ЦЛКС или ЛТЦ.

Общая координация проведения АВР осуществляется главным инженером ТУСМ (ЭТУС), а в необходимых случаях (при больших объемах и сложности восстановительных работ) главным инженером ТЦМС с выездом на место аварии в экстренных случаях.

В помощь подразделению, проводящему аварийно-восстановительные работы, должны привлекаться бригады соседних ЦЛКС или ЛТЦ (независимо от их принадлежности другим ТУСМ (ЭТУС) или ТЦМС).

Аварийно-восстановительные работы организуются немедленно после получения соответствующей информации, должны проводиться в объемах, обеспечивающих восстановление действия систем передачи в кратчайшие сроки, и вестись непрерывно.

Для оперативного восстановления действия связей ЦЛКС и ЛТЦ должны быть оснащены в необходимом количестве аварийным запасом кабелей, временных кабельных вставок, устройствами однокабельной работы, инструментом, измерительными приборами, инвентарем, механизмами и транспортом. Указанный аварийный запас должен храниться в специально отведенных закрытых помещениях, аварийных прицепах или автомобилях.

Расходование аварийного комплекта (запаса) допускается только для выполнения аварийно-восстановительных работ и срочных работ, направленных на предупреждение аварий.

Состав аварийного запаса утверждается ТЦСМ, АО "Электросвязь" по каждому ТУСМ (ЭТУС) для каждого ЦЛКС и ЛТЦ. Номенклатура и количество материалов, изделий и устройств, входящих в аварийный комплект, должны определяться в зависимости от конкретных условий трассы, расположения ЦЛКС и ЛТЦ, условий производства работ и др.

Пополнение аварийного запаса должно осуществляться немедленно по его расходованию.

Проверки полноты и исправности аварийного комплекта должны проводиться начальниками ЦЛКС и ЛТЦ ежеквартально и после каждого случая проведения аварийно-восстановительных работ, о чем должна делаться запись в специальном журнале.

Условия хранения и состояние аварийного запаса должны обеспечивать возможность его оперативного использования в любое время.

Перевозки приборов на необорудованных автомашинах должны осуществляться в специальных упаковочных ящиках, гарантирующих сохранность средств измерений.

При необходимости предприятия должны оснащаться монтажно-измерительными машинами, передвижными мобильными радиорелейными станциями, специальными плавсредствами, транспортом и т.д.

Для обеспечения возможности проведения аварийно-восстановительных работ, в аварийный комплект должны входить продукты питания, подлежащие длительному хранению или должны предусматриваться денежные средства для экстренного приобретения

продуктов питания), кухонные принадлежности и различная утварь, позволяющая обеспечить личный состав аварийно-восстановительной бригады питанием в течение не менее одних суток.

Планы ежегодной технической учебы персонала ЦЛКС, ЛТЦ, РВБ и производственных лабораторий должны в полном объеме предусматривать изучение вопросов, необходимых для успешного проведения аварийно-восстановительных работ, включая проведение практических тренировок с выездом на трассу.

При необходимости должны заключаться соответствующие договоры с управлениями и отрядами гражданской авиации о выделении вертолетов для доставки аварийных бригад к месту аварии.

Для быстрейшего сбора восстановительной бригады в каждом ЦЛКС, ЛТЦ разрабатывается соответствующая схема оповещения. Порядок сбора бригады согласно оповещению утверждается начальником ЦЛКС (ЛТЦ).

Последовательность выполнения аварийно-восстановительных работ, обеспечивающая оперативное действие связи, в каждом конкретном случае определяется руководителем восстановительных работ.

О намечаемых планах ликвидации аварии, ходе работ по устранению аварии и возникающих трудностях начальник ЦЛКС, ЛТЦ обязан немедленно докладывать руководству ТУСМ, ЭТУС, которое обязано сообщить о принятых мерах вышестоящей организации.

При устранении аварии на линейно-кабельных сооружениях обязательным является наличие постоянной служебной связи на всех уровнях управления.

В целях сокращения времени простоя каналов связи при аварийно-восстановительных работах, применять временные активные и пассивные вставки и устройства однокабельной работы. Решение об использовании указанных способов принимается руководителем восстановительных работ.

Длительностью устранения повреждений считать время восстановления связей в полном объеме путем включения временных кабельных вставок, переключения на резервные кабельные и радиорелейные тракты и т.д.

Переход на постоянный вариант работы линейно-кабельных сооружений осуществляется только после проведения полного комплекса подготовительных работ, гарантирующих надежную работу кабельной линии. После монтажа постоянной вставки, перед переключением связей, должны быть проведены все необходимые контрольные измерения электрических и оптических параметров кабеля.

Возвращение восстановительных бригад с линии разрешается только после получения подтверждения о нормальной работе систем связи.

Аварийно-восстановительные работы на линейно-кабельных сооружениях должны проводиться в соответствии с действующими правилами и требованиями системы оперативного управления сетью.

Все аварии на линейно-кабельных сооружениях магистральных и внутризоновых линий передачи ВСС РФ подлежат расследованию с составлением соответствующих актов.

Расследование аварий производится комиссиями, состав которых определяется ТЦМС, АО "Электросвязь". Во всех случаях в состав комиссий включаются руководитель или главный инженер предприятия, на сооружениях которого произошла авария.

Расследование особо крупных аварий на магистральных кабельных линиях производится комиссиями, назначенными Минсвязи РФ. При необходимости в состав комиссий включаются представители научно-исследовательских и проектных институтов, а также заводов-изготовителей кабельной продукции.

При авариях на кабельных линиях, вызванных работами сторонних организаций, производится расследование с составлением двустороннего акта о причинах аварии.

В процессе расследования необходимо:

выявить причину и виновных в возникновении аварии;

выяснить обстоятельства, способствующие аварии;

рассмотреть и оценить: организацию работ ЦЛКС, ЛТЦ по ликвидации аварии и подготовленность ремонтно-восстановительных бригад; умение и оперативность действий технического персонала, участвовавшего в ликвидации аварии; точность определения участка и места аварии;

эффективность и достаточность применяемых средств механизации и транспорта; эффективность применяемых методов предупреждения аварий;

определить меры, исключающие возникновение подобных аварий в дальнейшем.

Материалы расследования аварий должны включать объяснение руководителей структурных подразделений и предприятий.

О каждой аварии на линейно-кабельных сооружениях должен быть составлен аварийный акт.

Аварийные акты составляются в трех экземплярах, из которых: один остается на ЦЛКС или ЛТЦ, один - в ТУСМ (ЭТУС), один в пятидневный срок после ликвидации аварии при необходимости или запросу отправляется вышестоящей организации (ГЦУМС, АО "Электросвязь").

Акты расследований с информацией о принятых мерах в 15-дневный срок по запросу должны высылаться ТЦМС в ГЦУМС;

После устранения аварии или повреждения обязательным является внесение в кратчайший срок соответствующих изменений в паспорт (планшет) кабельной трассы.

Предприятия, управления и организации связи должны ежегодно проводить подробный анализ причин и хода устранения аварий, разрабатывать и осуществлять мероприятия, направленные на улучшение качественных показателей технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений, повышение их надёжности и долговечности.

11.3 Измерения при технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений

На линейно-кабельных сооружениях проводятся приемосдаточные измерения и измерения в процессе эксплуатации.

Приемосдаточные измерения проводятся в процессе работы рабочих и Государственных приемочных комиссий по приемке законченных строительством или реконструкцией магистральных или внутризональных кабельных линий передачи с целью проверки качества выполненных работ и соответствия электрических и оптических параметров линейных сооружений нормам на смонтированные регенерационные (усилительные) участки.

Работа приемочных комиссий регламентируется утвержденными строительными нормами и правилами, а также действующими правилами, инструкциями и руководствами по приемке в эксплуатацию законченных строительством и реконструкцией междугородных кабельных линий передачи. Измерения, как правило, должны проводиться в полном объеме.

Представители эксплуатационной организации принимают участие в измерениях электрических и оптических параметров линейно-кабельных сооружений с правом подписи протоколов измерений.

В комплекс приемосдаточных электрических измерений входят:

- ✚ измерения электрических и оптических параметров кабеля;
- ✚ измерения электрических параметров, определяющих защиту линейных сооружений от электромагнитных влияний и коррозии;
- ✚ измерения заземлений;
- ✚ измерения глубины залегания кабелей (по трассе - выборочно; на спусках, подъемах, в оврагах и других опасных местах – сплошным обходом).

Приемосдаточные электрические измерения линейно-кабельных сооружений, принимаемых на баланс или в эксплуатационно-техническое обслуживание от других организаций, должны выполняться в полном объеме.

Измерения в процессе технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений проводятся с целью определения их состояния в соответствии с нормативными требованиями, предупреждения повреждений, а также накопления необходимого статистического материала для разработки мероприятий по повышению надежности линейно-кабельных сооружений.

В процессе технической эксплуатации проводятся следующие измерения: *профилактические, аварийные, контрольные, специальные.*

Профилактические измерения проводятся в порядке плановых мероприятий с целью своевременного выявления и устранения возникающих отклонений электрических и оптических параметров линейно-кабельных сооружений от установленных норм:

- ✚ электрических параметров (постоянным током), характеризующих состояние жил (проводов) кабелей: электрическое сопротивление шлейфа жил или проводников, разность электрического сопротивления жил, электрическое сопротивление изоляции жил, проводников и шланга и электрические испытания изоляции жил и проводников напряжением;
- ✚ оптических параметров: затухание и неоднородности оптических волокон кабеля;
- ✚ электрических параметров характеризующих коррозионное состояние подземных металлических сооружений, а также устройств их защиты от коррозии;
- ✚ электрических параметров устройств защиты обслуживающего персонала и линейно-кабельных сооружений от внешних электромагнитных влияний;
- ✚ определение целостности грозозащитных тросов.

Профилактические измерения проводятся в объёме и в сроки, определяемые главным инженером эксплуатационного предприятия по согласованию с вышестоящей организацией (ТЦМС, АО "Электросвязь") в зависимости от конкретных условий эксплуатации линии (вечная мерзлота, оползни, вибрация, повышенная грозовая активность и т.д.) и необходимости обеспечения её эксплуатационной надёжности.

Контроль электрического сопротивления изоляции полиэтиленовых шлангов кабелей (оболочка - земля, оболочка - броня, броня - земля) проводится 1 раз в год (весной или осенью).

Целостность подземных грозозащитных проводов (тросов) и переходное сопротивление "трос - земля" должны проверяться 1 раз в 2 - 3 года.

Аварийные измерения проводятся с целью определения характера и места повреждения кабелей.

Аварийные измерения проводятся в следующем порядке:

- ✚ измерение электрических и оптических параметров кабеля для определения характера повреждения и выбора метода измерения для определения места повреждения;
- ✚ измерения по определению района повреждения и уточнению конкретного места повреждения;
- ✚ измерения кабелей в обе стороны от места повреждения.
- ✚ *Контрольные измерения* проводятся после устранения повреждений с целью определения качества ремонтно-восстановительных работ.
- ✚ Контрольные измерения проводятся с окончательных устройств после монтажа постоянной вставки, а также после окончания работ по устройству постоянной вставки перед сдачей систем в эксплуатацию.

- ✚ После монтажа постоянной вставки выполняется комплекс оптических и электрических измерений постоянным током, включая проверку правильности соединения волокон (жил) и отсутствия обрывов и сообщений жил.
- ✚ После окончания работ по устройству постоянной вставки, перед сдачей систем в эксплуатацию проводится повторное испытание состояния изоляции жил кабеля напряжением (при наличии ДП по жилам кабеля).
- ✚ Если при контрольных измерениях будет выявлен хотя бы один параметр, не удовлетворяющий норме, работы по устранению повреждения должны быть продолжены. После их завершения полный комплекс контрольных измерений следует провести повторно.
- ✚ При контрольных измерениях оптических кабелей производятся измерения общего затухания регенерационного участка, затухания восстановленной части участка, затухания потерь во вновь проявившихся на линии сростках и измерения сопротивления изоляции наружной оболочки кабеля (при наличии металлической брони).

Специальные измерения проводятся в период опытной эксплуатации кабельных линий передачи с новыми типами кабелей или кабельной арматурой и оборудованием, а также при внедрении или испытаниях новых способов защиты линейно-кабельных сооружений от опасных и мешающих влияний.

Длительность опытной эксплуатации определяется Государственной приемочной комиссией.