

Лекция 1.

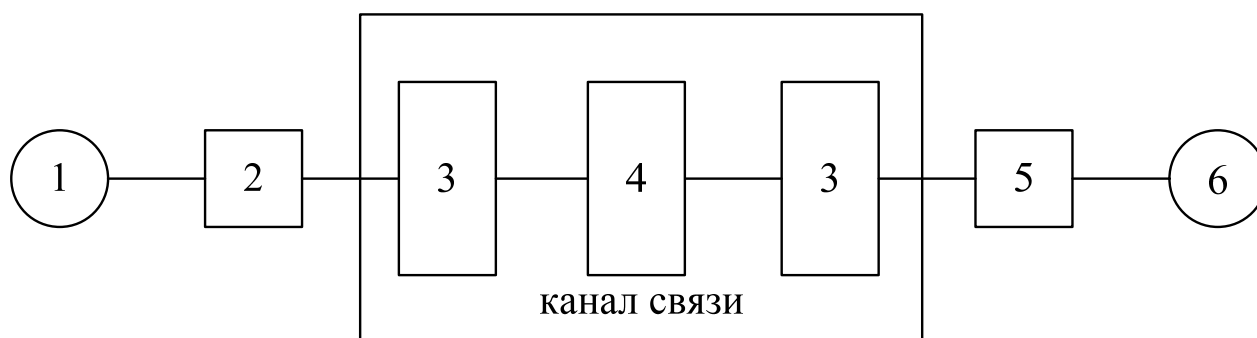
Список литературы:

1. Андреев В.А. – Направляющие системы электросвязи, 2009
2. Гроднев – Линии связи, 1988
3. Качановский – Линии связи, 1995
4. Попов В. Б – Линии связи, 1998
5. Справочник Строительство кабельных линий связи.
6. Листвин Оптические волокна для линий связи.
7. Листвин – Оптические волокна и кабели, 2006
8. Семенов Техническая электродинамика.

Место и роль линейных сооружений в системе 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.

Место и роль линейных сооружений в обобщённой структурной схеме системы электросвязи.



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.

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:

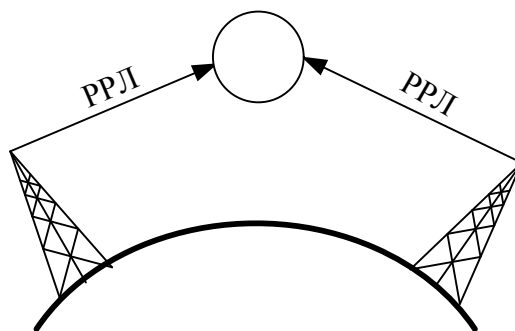
-  Высокая скорость установления связи, неограниченное число абонентов, слушателей и зрителей.
-  Единственный вариант связи с подвижными, а также удаленными и космическими объектами.
-  Возможность организовывать связь с неограниченным количеством абонентов, слушателей, зрителей.

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. 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.

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.

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. В начале пятидесятих годов получили развитие коаксиальные кабели, обладающие более широким частотным диапазоном, и имеющие хорошую защиту от взаимных и внешних влияний. И, начиная с шестидесятих годов, коаксиальные кабели – это основа магистральной связи, причём по одной коаксиальной паре организовались до 10000 телефонных каналов междугородней связи.

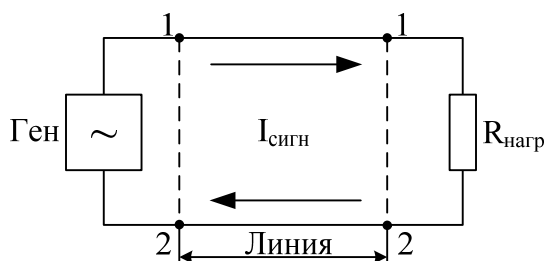
Недостатки коаксиальных кабелей

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

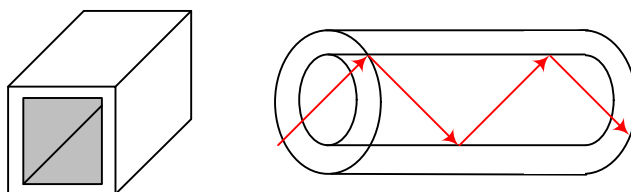
Основные разновидности НСЭ **Рабочий частотный диапазон**

По конструкции все НСЭ можно разделить на два основных вида:

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

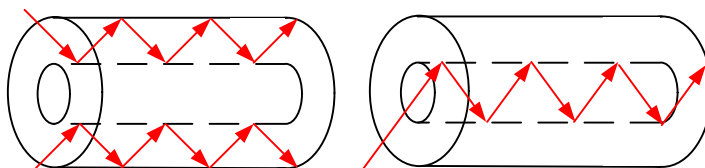


2. **Волноводные направляющие системы электросвязи.** Они представляют собой конструкцию в виде полый трубы, изготавливаемой из цветных металлов, или трубы прямоугольного сечения, внутри которой распространяется электромагнитная волна. Труба может быть круглого и прямоугольного сечения.



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	Магистралы, отводы от магистралы, связь внутри области.
КК, ЛПВ	$0 - 10^9$	До 10 000	Магистралы, отводы от магистралы, связь внутри обл.
ЧРК	$0 - 10^{10}$	До 10 000	Антенно – фидерные устройства. (АФУ)
Металлические и диэлектрические волноводы	$10^{10} - 10^{11}$	До 100 000	АФУ
Световоды, оптические кабели, ВОЛП	$10^{14} - 10^{15}$	До 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 конечных устройств.

Недостатки НСЭ

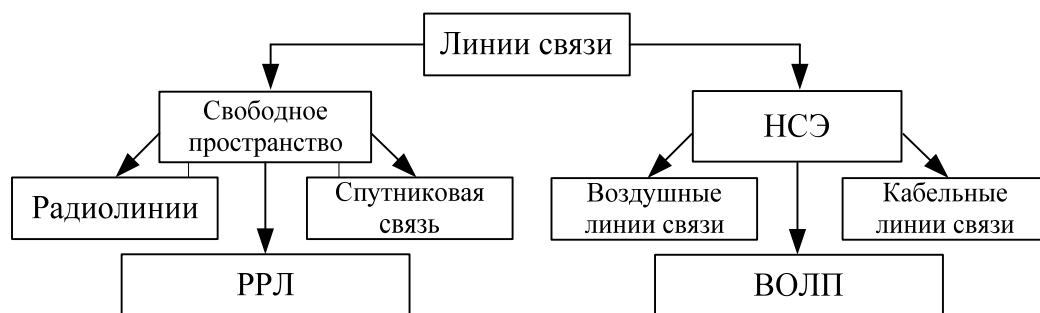
- ✚ Более низкая скорость установления соединения и передачи информации, чем по радиоканалам.
- ✚ Большие капитальные и эксплуатационные расходы по сравнению с радиоканалами. Однако более 70% всей сети электросвязи состоит из проводных каналов, и только 10%–15% составляют радиорелейные и спутниковые 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 ($3 \cdot 10^{13}$ Гц – $3 \cdot 10^{15}$ Гц)

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.



Лекция №2

Многоканальные системы передачи по линиям связи. **Основные требования к ним.**

Для наиболее полного использования рабочего диапазона частот направляющих систем электросвязи применяют многоканальные системы передачи. При этом возможна организация аналоговых или цифровых каналов связи на базе аналоговых или цифровых систем передачи. В АСП за базовый принят телефонный канал шириной спектра 4 КГц. Канал, организованный на основе такого спектра частот, называется каналом тональной частоты. В диапазоне канала тональной частоты работает обычный телефонный аппарат. Линейный сигнал многоканальной АСП формируется из набора каналов тональной частоты, преобразованных системами группообразования спектров частот линейного сигнала. Выделение отдельных каналов тональной частоты и отдельных частотных полос линейного спектра частот производится с помощью набора фильтров. В цифровых системах передачи за базовый канал принят телефонный канал с шириной спектра 64 КГц. Передача сигналов осуществляется поочерёдно в различные интервалы времени в виде определённых кодов. Наибольшее применение получила импульсно – кодовая модуляция сигналов (ИКМ). Здесь формируются импульсы наносекундной длительности, которые передаются в линию и декодируются на приёмном устройстве.

Преимущества АСП над ЦСП

-  Менее жёсткие требования к помехозащищённости цепей.
-  Возможность непосредственного ввода от различных источников системы передачи и её последующая обработка.
-  Эти преимущества обуславливают большую дальность связи при сохранении высокого качества.
-  Они позволяют создать интегрированные сети для различных источников информации, в частности, цифровую сеть передачи данных, а также различные корпоративные сети с закрытой информацией, использующие специальные коды.

В основу построения ЦСП положена определённая **цифровая иерархия**, которая подразделяется на ступени:

Сначала была разработана **плезиохронная** иерархия. В основу первой ступени цифровой иерархии положена стандартная скорость передачи 2,48 Мбит/сек, что соответствует 30 стандартных цифровых каналов.

Ступени иерархии	МСП	Тип НСЭ	Номинальная скорость передачи, Мбит/сек
1	ИКМ-30	СК, ОК	2,048
2	ИКМ-120	СК, ОК	8,45
3	ИКМ-480	КК, ОК	34,37
4	ИКМ-1920	КК, ОК	139,26
5	ИКМ-7680	ОК	560

Из этой таблицы виден недостаток ЦСП: требуется более широкий диапазон НСЭ, поэтому воздушные линии вообще не пригодны для ЦСП. Начиная с пятой ступени иерархии, можно использовать только оптический кабель. Однако существенные преимущества ЦСП совместно с высокой технологичностью производства, отсутствием моточных деталей (катушек) и малые размеры ЦСП привели к тому, что АСП практически полностью сняты с производства и постепенно заменяются на ЦСП. В настоящее время плезиохронная система иерархии и, соответственно аппаратура, вытесняется СЦИ, которая обладает рядом достоинств, отсутствующих у ПЦИ.

Достоинства ЦСП

При необходимости выделения части каналов транзитных пунктов ПЦИ полной расшивки и сшивки цифрового потока. В СЦИ этого не требуется. Там можно выделить любой канал в любом транзитном пункте без расшифровки цифрового потока. Первой ступенью СЦИ является ступень, совместимая с четвёртой ступенью ПЦИ. При этом скорость передачи увеличена до 155 Мбит/сек для введения дополнительных синхросигналов, а число каналов такое же, как в четвёртой ступени ПЦИ.

Аппаратура ЦСП, реализующая первую ступень, называется СТМ-1 – синхронный транзитный модуль. SDN , базируется на использовании только оптических кабелей, как НСЭ.

Городская связь

СП	Число каналов	Частотный диапазон, КГц	НСЭ
ИКМ – 30	30	2000	СК
ИКМ - 120	120	8500	ОК, СК
ИКМ - 480	480	34000	---/ /---

Зоновая связь

СП	Число каналов	Частотный диапазон, КГц	НСЭ
К – 60П	60	250	СК
К – 120	120	1300	КК
К – 420	420	4600	КК
ИКМ – 120	120	8500	СК, ОК
ИКМ - 480	480	34000	---/ /---

Магистральная связь

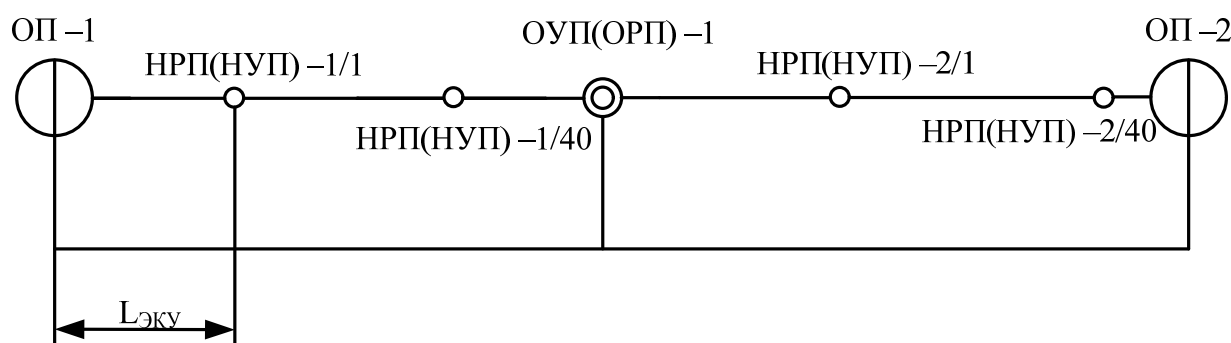
СП	Число каналов	Частотный диапазон, КГц	НСЭ
К – 60	60	250	СК
К – 300	300	1300	КК
К – 10200	1020	4700	СК
К – 1920	1920	8500	КК
К – 3600	3600	18000	КК
К – 10800	10800	60000	КК
ИКМ – 120	120	8500	СК, ОК
ИКМ – 480	480	34000	---/ /---
ИКМ – 1920	1920	140000	КК, ОК
ИКМ – 7680	7680	140000*4	ОК

В настоящее время выпускают универсальную аппаратуру ИКМ ВОСП для плезиохронной цифровой иерархии, рассчитанную на первую ступень ПЦИ и позволяющую обеспечить 30 цифровых каналов. Её основное назначение СТС. ОБВГ обеспечивает организацию 120 цифровых каналов и используется на всех типах сетей связи. ОТВГ 32 (Оборудование Третичного Временного Группового Образования) и ОТВГ 35 – 480 стандартных цифровых каналов, универсально по своему применению для всех видов сетей. За рубежом все эти устройства называют мультиплексорами.

Дальность связи с использованием МСП определяется энергетическими характеристиками НСЭ: затуханием и помехозащищённостью.

В среднем дальность связи без дополнительных усилительных пунктов в АСП составляет 20 – 30 км (максимум 200 – 300 км в ЦСП, работающих по ВОЛС). Поэтому в большинстве случаев линейный тракт состоит из совокупности линий связи, усилительных пунктов в АСП и регенерационных пунктов в ЦСП.

Структура линейного тракта



- ✚ Обеспечение передачи информации с заданным качеством на расстояние до 12,5 тыс. км в пределах страны и до 25 тыс. км на междугородных линиях.
- ✚ Возможность передачи различных видов сообщений (телефонных, телеграфных, телевизионных и др.).
- ✚ Высокая защищённость от взаимных и внешних электромагнитных помех.
- ✚ Надёжность и экономичность построения систем электросвязи.

Этими характеристиками обладают только кабельные линии связи с качественными диэлектриками и проводниками. Для междугородней связи на дальние расстояния предъявляемым требованиям в наибольшей степени соответствуют коаксиальные кабели и волоконные световоды на местной связи.

Начиная, с 1993 года в нашей стране все вновь проектируемые линии являются волоконно-оптическими.

Лекция №3

Пункт 2.1

Построение сетей электросвязи

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 (телефонное, телеграфное, аппараты ЭВМ).
- ✚ Системы коммутации цепей и конечных устройств, а также каналов и пакетов передаваемой информации.
- ✚ Каналы электросвязи (МСП + среда распространения)

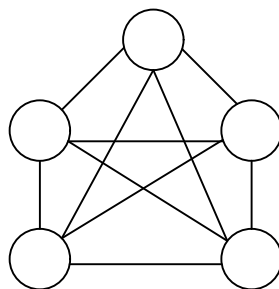
Таким образом, любая сеть электросвязи будет состоять из узлов:

- ✚ Пункты коммутации цепей и каналов
- ✚ Рёбра и линии 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 путей установления соединения с другими узлами.

Варианты построения сети электросвязи

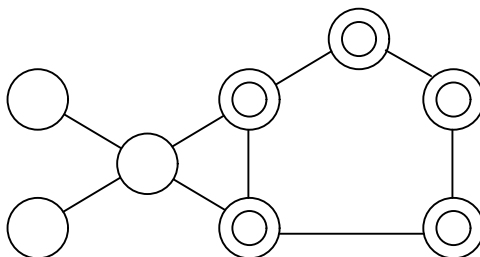
По принципу «каждый узел с каждым» – это полносвязное соединение. В этом случае каждый узел имеет прямое соединение со всеми другими.



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

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

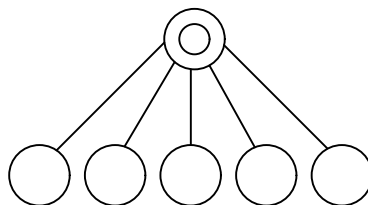
Узловой принцип – несколько узлов, наиболее важных в структуре сети соединяются по принципу «каждый с каждым», менее важные узлы соединяются только с ближайшими (количество кружков – важность узлов).



Достоинства: гибкая структура построения, большая экономичность построения.

Недостатки: уменьшается надёжность функционирования менее важных узлов.

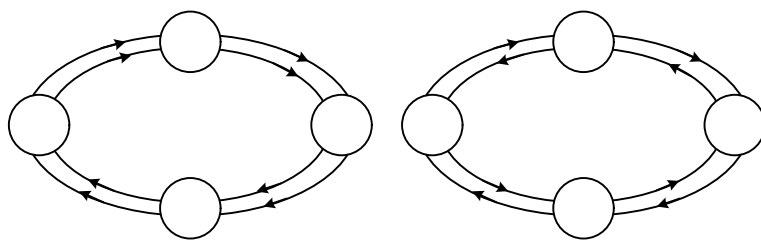
Радиальный принцип – важный узел связан с менее важными одной линией.



Достоинства: самая высокая экономичность.

Недостатки: самая низкая надёжность.

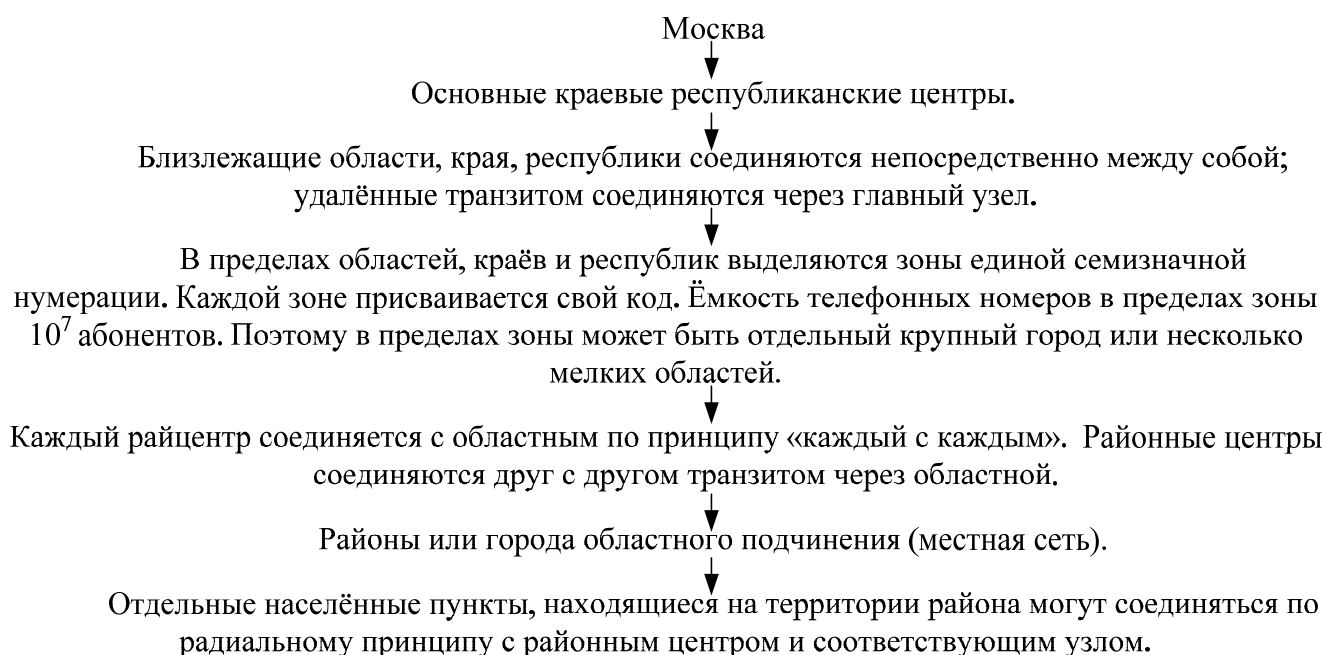
Кольцевая структура.



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».



В настоящее время в связи с широким внедрением ВОЛС, обладающих большой пропускной способностью, находит применение на всех элементах сети электросвязи кольцевой принцип построения сети с использованием всех 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 ВОЛС. При построении сети электросвязи соблюдается производственно-территориальный принцип административно-технического управления сетью. Координируют работу электросвязи министерства РФ по связи и информатизации через линии связи республик, а также акционерные общества, которые объединяют все сети связи в пределах области, руководят и управляют ими через соответствующие подразделения РУЭСЫ, ГУЭСЫ, ЭТУЭСЫ.

Магистральную междугороднюю связь обеспечивает акционерное общество Ростелеком через свои филиалы, называемые территориальными центрами управления магистральной связью и телевидением.

Дальнюю связь в настоящее время организуют и ведомственные сети, в частности, сети электросвязи министерств путей сообщения. Сети общего пользования и ведомственные сети объединяются в пределах взаимоувязанной сети РФ (ВСС 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 зонную сеть. Местная сеть входит в состав сети абонентского доступа.

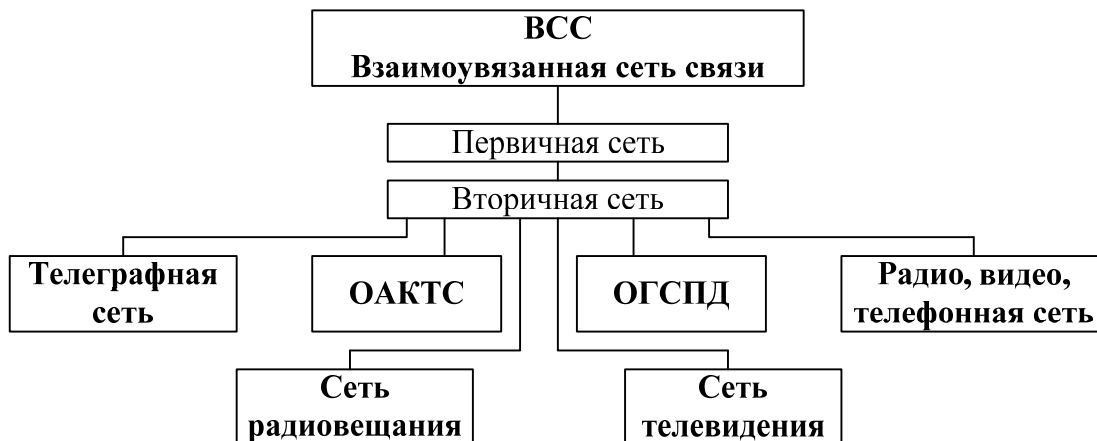
Первичная и вторичная сети:

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 4

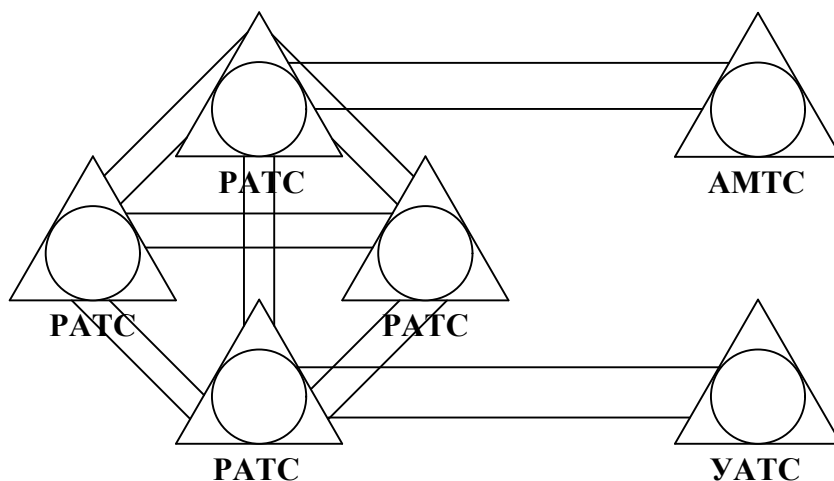
Пункт 2.2

Городская телефонная сеть

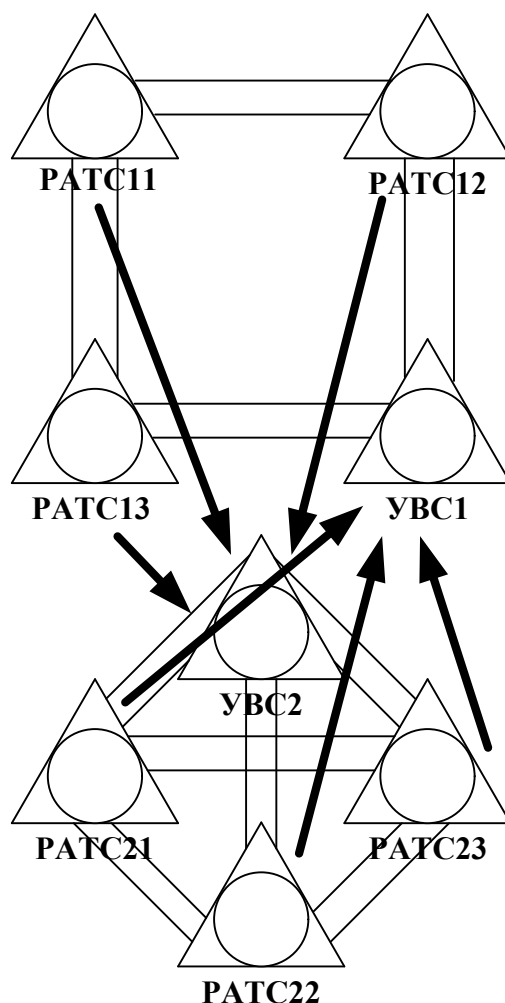
Обеспечивает телефонной связью абонентов в пределах города, а также выход на междугородную, внутризонавую и сельско–пригородную связь. Система построения сети зависит от количества абонентов сети, которое в свою очередь определяется величиной и значением в городе. В соответствии с этим можно выделить **три варианта построения сети:**

- ✚ Сети районных центров городского типа и городов областного подчинения.
- ✚ Сети областных центров и городов республиканского значения.
- ✚ Сети крупных промышленно-административных центров.

Телефонные сети небольших городов и райцентров строятся за счёт создания структуры сети по принципу каждый с каждым для главного узла, которым обычно является центральная станция. Второстепенными узлами являются различные ведомственные и учрежденческие станции. В больших городах телефонная сеть районизируется с выделением районных РАТС.



На такой сети обычно используется пятизначная нумерация. Первая цифра номера - индекс телефонной станции. Общее количество телефонных станций на такой сети не должно превышать 8. В качестве стандартных блоков оборудования АТС выпускаются десятитысячные блоки. Таким образом, максимальная ёмкость ГТС при такой структуре сети обычно составляет 80000 номеров. При необходимости обеспечения большей ёмкости сети переходят к построению ГТС с узлами входящего сообщения (УВС).

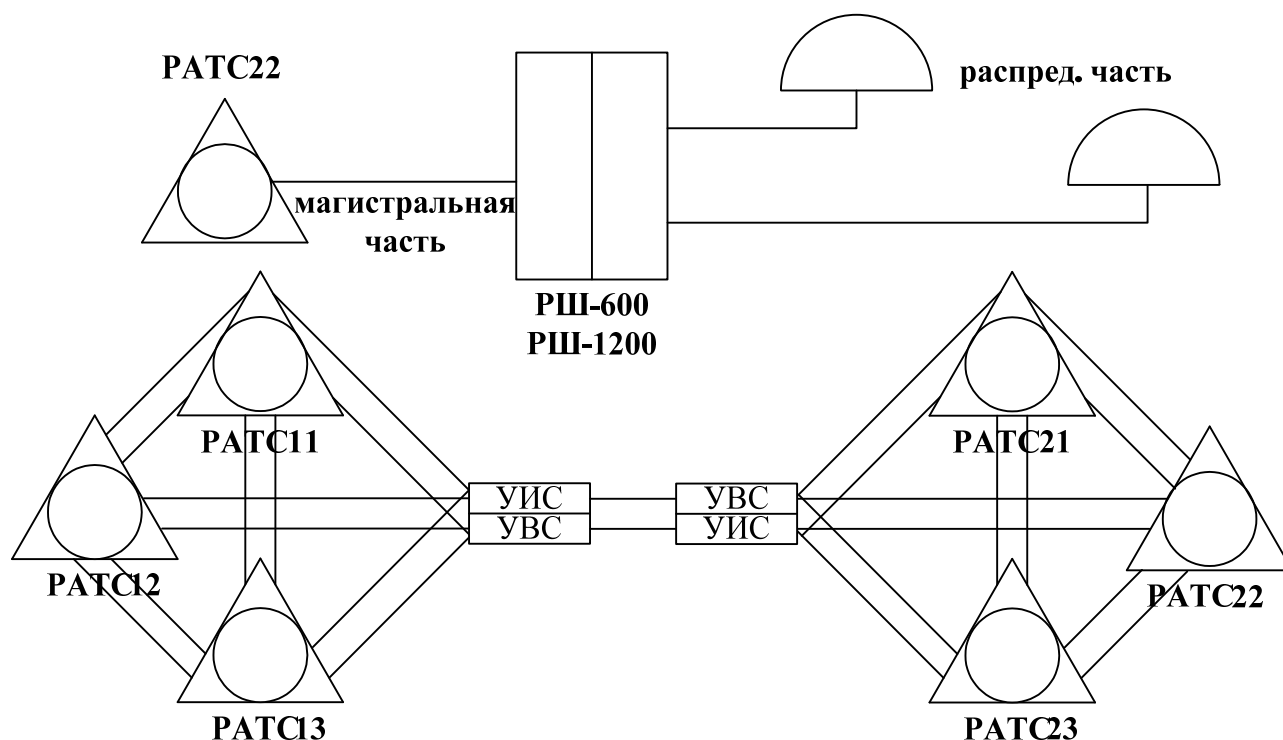


На таких телефонных сетях вводится 6-тизначная нумерация, причём первая цифра номера в этом случае – это номер УВС, вторая цифра номера – это номер станции в пределах данного узла. Максимальная ёмкость такой сети 800000 тысяч номеров. В настоящее время данная структура построения сети является основной для сети областных центров РФ. При необходимости дальнейшего увеличения ёмкости сети кроме узлов входящего сообщения выделяются узлы исходящего сообщения (УИСы), при этом также формируются узловые районы с совмещением узлов исходящего и входящего сообщения в одном здании.

Максимальная ёмкость ГТС с семизначной нумерацией 8000000 абонентов. Абонентская сеть в пределах одной телефонной станции строится по шкафному принципу. При этом на территории города, обслуживаемого одной станцией, выделяются шкафные районы, где устанавливаются распределительные шкафы на 600 и 1200 пар.

Внутри распределительных шкафов устанавливаются боксы БКТ (магистральные и распределительные). Шкафная система построения абонентских линий обеспечивает гибкость и экономичность построения сети абонентских линий. Экономичность обеспечивается за счёт введения разного эксплуатационного запаса на магистральную и абонентскую часть абонентской линии.

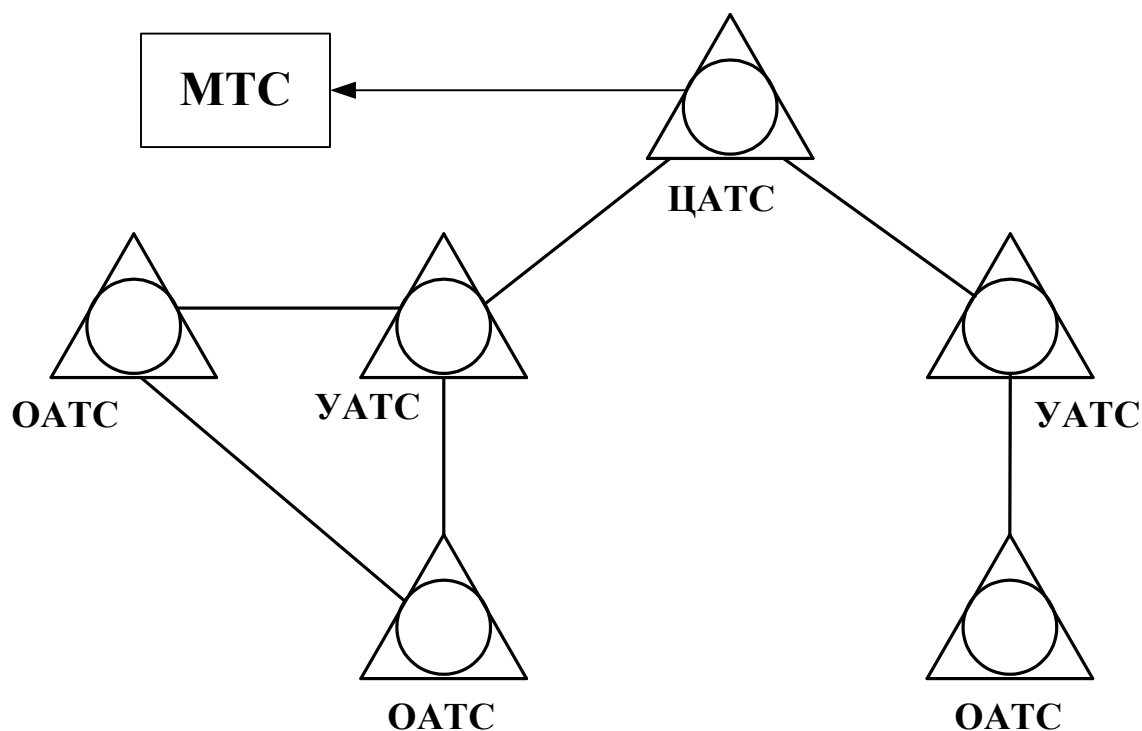
Эксплуатационный запас переключает повреждённые цепи на резервные пары. Таким образом, на самую протяжённую часть абонентской линии мы используем количество кабеля на 17 – 18 % меньше, чем на распределительную часть абонентской линии. На расстояние до 500 метров от телефонной станции магистральная и распределительная часть абонентской линии соединяются в муфтах напрямую без шкафов, так как в этом случае стоимость шкафа и его монтажа будет дороже соединения напрямую, поэтому в радиусе 500 метров от станции бес шкафная система. При том эксплуатационный запас 5 –10 % на распределительной части абонентской линии. На магистральной части запас составляет 3 – 5%. Поэтому, при бесшкафной системе часть пар в распределительных коробках запараллеливается, то есть бесшкафная система становится менее гибкой по сравнению со шкафной. По надёжности преимущественна бесшкафная система, так как в муфтах жилы соединяются в одной точке, а в шкафах в двух точках под винт.



В сельском районе создаются следующие виды электросвязи:

1. Сеть общего пользования для всех потребителей (телефон, телеграф, сеть радиовещания).
2. Учрежденческо-производственная связь для предприятий административно-хозяйственного и культурного сообщества различных министерств и ведомств
3. Внутрипроизводственная связь для предприятий различных форм собственности.

СТС строится по радиально-узловому принципу.



В районном центре устанавливается центральная станция, соединяющаяся по принципу «каждый с каждым» с любой станцией района.

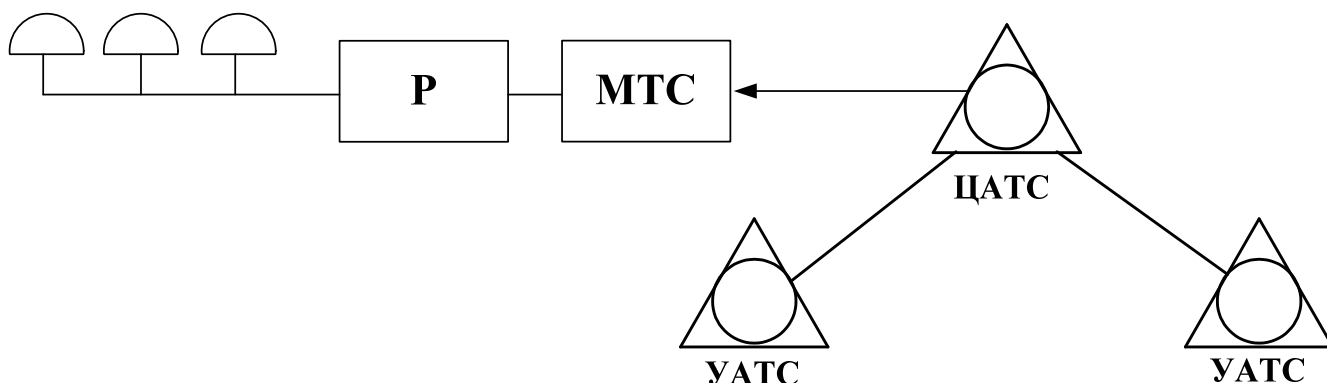
В крупных населённых пунктах устанавливаются узловые АТС, которые по радиальному принципу включаются на конечные АТС. Для небольших сёл устанавливаются рокадные или поперечные связи. Таким образом, абоненты ряда сёл устанавливают между собой соединения через узловую станцию, не выходя на центральную. При необходимости выхода на МТС все ОАТС подключают транзитом через УАТС, а УАТС через ЦАТС.

Пункт 2.4

Сеть проводного радиовещания в пределах населённых пунктов.

Строится по однозвенной, двухзвенной и трёхзвенной структурах.

Однозвенная структура: выделяется радиоузел, на который транзитом через МТС от него по радио фидерам с напряжением 30В подаётся вещание на распределительный щеток.



Двухзвенная структура применяется в небольших городах и посёлках городского типа. Наряду с радиоузелом строится сеть трансформаторных подстанций. Радиоузел с подстанцией соединяет высоковольтный радио фидер с напряжением 1000В, чем резко снижается диаметр проводников. На трансформаторных подстанциях напряжение снижается до 30В и подаётся непосредственно абонентам. Количество подстанций обычно не превышает 10. Причём общая ёмкость радиотрансляционной сети обычно не превышает 20 тысяч абонентов.

Трёхзвенная структура предполагает выделение отдельных районов на территории города, как правило, совпадающих с административным делением. Причём в каждом районе выделяется своя станция, совмещенная, обычно с радиостудией. Все усилительные станции соединяются в сеть с центральным радиоузелом. В каждом районе обслуживается до 20000 абонентов со своей сетью подстанций, до которых напряжение подаётся с усилительной станции по высоковольтным радио фидерам.

Пункт 2.5

Перспективы развития и функционирования ВСС РФ

Дальнейшее развитие ВСС базируется на широком внедрении цифровых систем передачи и ВОЛС. При этом обеспечивается единая техническая политика в развитии сети, единая нумерация. И в дальнейшем предполагается тесная координация работы всех ведомственных сетей из единого центра управления, созданного на базе компьютерной техники с возможностью широкого резервирования и управления всей сетью электросвязи в целом. Поэтому основой центров управления являются мощные вычислительные комплексы, обладающие возможностями коммутаций каналов и пакетов передаваемой информации. В перспективе ВСС РФ может считаться полностью созданной, если любой абонент этой сети путём набора обычного номера сможет соединиться с любым абонентом сети электросвязи земного шара. Таким образом, в настоящий момент требуется дальнейшая модернизация и развитие ВСС РФ с целью решения данной задачи. Причём в ближайшее время основой ВСС станут глобальные цифровые сети, обеспечивающие передачу мощных потоков информации в требуемом направлении и с заданным качеством. Это возможно в направлении дальнейшей интеграции в способах передачи информационных сообщений и интеллектуальных сетей, обеспечивающих абонентам весь набор услуг электросвязи.

Конструкции НСЭ и их монтаж

Весь необходимый материал по данной теме содержится в методической разработке к лабораторным работам по разделу курса линий связи «конструкции направляющих систем связи и их монтаж». 1989г. Составитель Попов Б.В.

Лекция №5

Электродинамика направляющих систем электросвязи

Пункт 4.1

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: $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[\frac{\Phi}{м} \right]$ – 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 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right]$ – 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:

$$\sigma \left(\frac{\text{См}}{\text{м}} \right), \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\text{Ом}}{\text{м}} \right).$$

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.

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \left[\frac{\text{Вб}}{\text{м}} \right]$$

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

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

Однородная среда:

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

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

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

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

Линейная среда:

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

Изотропная среда:

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

Анизотропная среда:

Среда будет анизотропной, если хотя бы одна из величин $\varepsilon_a, \mu_a, \sigma$ – 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 $\omega \varepsilon_a$.

Магнитные свойства среды можно охарактеризовать произведением $\mu \varepsilon_a$.

Таким образом, можно составить зависимость:

$$\left| \frac{I_{np}}{I_{см}} \right| = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \gg 1, \text{ для проводников}$$

$$\left| \frac{I_{np}}{I_{см}} \right| = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} = 1, \text{ для полупроводников}$$

$$\left| \frac{I_{np}}{I_{см}} \right| = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 1, \text{ для диэлектриков}$$

Таким образом, можно охарактеризовать любую среду в зависимости от частоты электромагнитного поля. Для хороших проводников $\sigma = 10^{-8} \left[\frac{Cм}{м} \right]$.

Существует и обратное соотношение:

$$\left| \frac{I_{np}}{I_{см}} \right| = \frac{\omega \varepsilon_a}{\sigma} < 0.1, \text{ для проводников}$$

$$\left| \frac{I_{np}}{I_{см}} \right| = \frac{\omega \varepsilon_a}{\sigma} > 10, \text{ для диэлектриков}$$

$$\left| \frac{I_{np}}{I_{см}} \right| = 0.1 < \frac{\omega \varepsilon_a}{\sigma} < 10, \text{ для полупроводников}$$

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.

Пункт 4.2

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.

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

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.

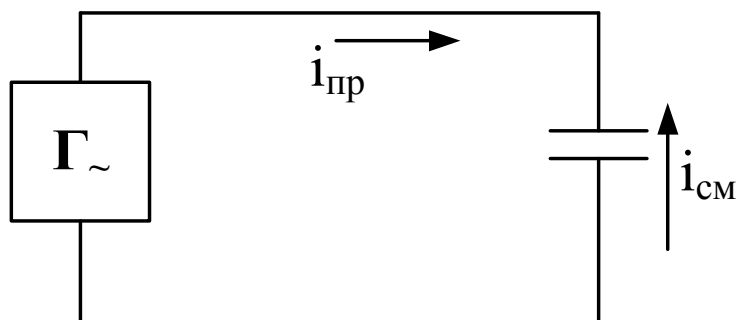
Для этого используют запись уравнений в дифференциальной форме:

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

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

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

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

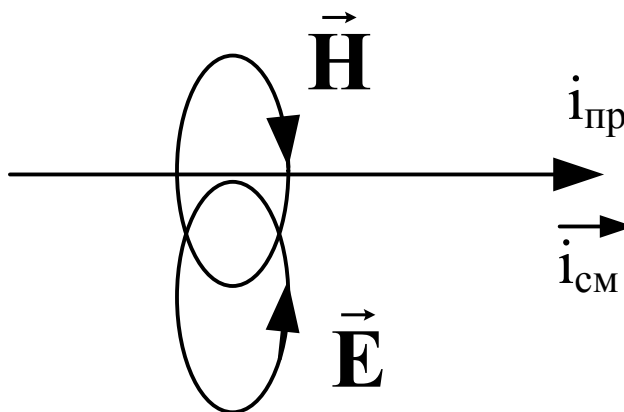


Данная запись предполагает, что электромагнитное поле имеет гармоническую форму или представляется в виде набора гармоник. При этом:

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

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:

$$\text{div}\vec{D} = \rho, \quad - \text{определяет плотность заряда (измеряется в Кл/м}^3\text{)}.$$

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.

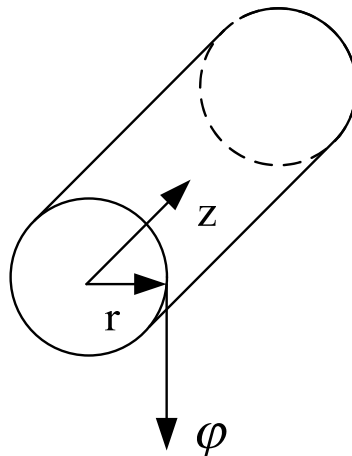
Для **металлических проводников**, где действуют только токи проводимости, система уравнений Максвелла записывается:

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

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

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

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.

Система уравнений Максвелла в цилиндрических координатах для проводников:

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

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

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

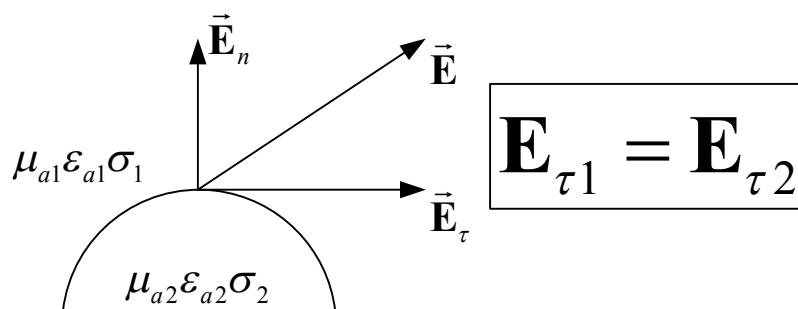
Зная действие составляющих поля в соответствующих точках пространства, мы можем однозначно решить любую электродинамическую задачу.

Пункт 4.3

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.

$$\mathbf{H}_{1n} - \mathbf{H}_{2n} = i_S$$

Лекция №6

Пункт 4.4

Баланс мощностей, теорема Умова – Пойнтинга.

Энергия электрического и магнитного поля связаны соотношением:

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

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:

$$-\frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) dV = \int_S [\vec{E}, \vec{H}] dS + \int_V \sigma E^2 dV$$

- ✚ 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:

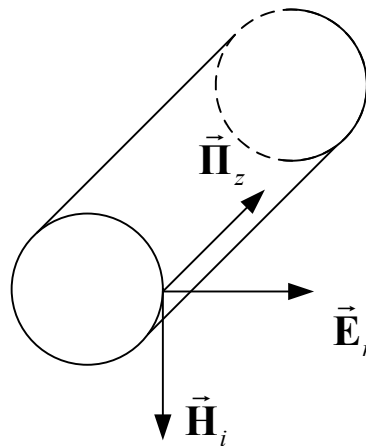
$$[\vec{E} \cdot \vec{H}] = \vec{P}$$

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 .

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

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:

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

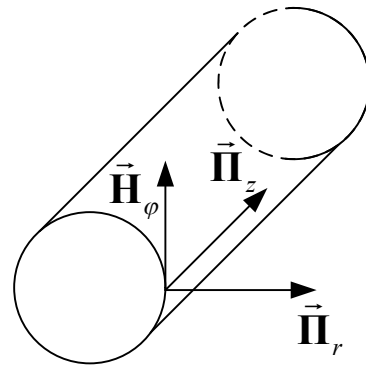
✚ Процесс передачи энергии:

✚ Процесс излучения энергии:

✚ Процесс поглощения энергии:

Согласно закону Джоуля-Ленца:

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



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

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

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

Пункт 4.5

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:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Данный режим используется для определения ёмкости цепи.

Стационарный режим

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

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \sigma \vec{E} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

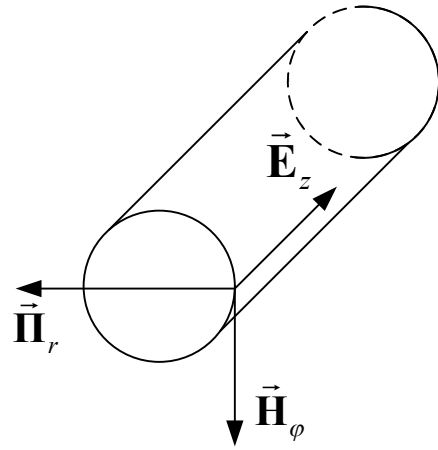
Стационарный режим позволяет определить индуктивность цепи.

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.

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

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



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 НЕ и ЕН.

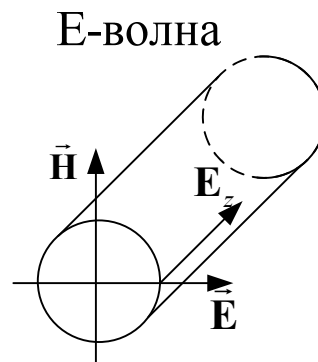
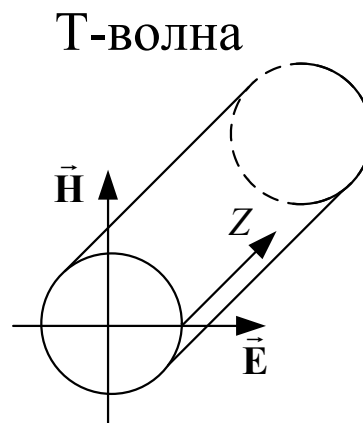
Пункт 4.6

Классификация электромагнитных волн в НСЭ.

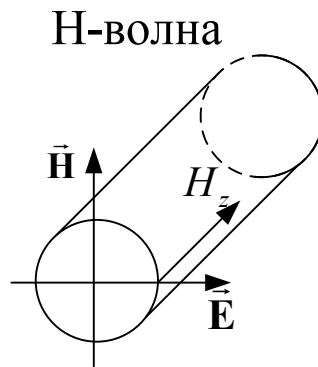
Характер распространения электромагнитного поля в НСЭ зависит прежде всего от класса волны, используемой для передачи электромагнитной энергии.

Различают 4 класса электромагнитных волн:

Т-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.



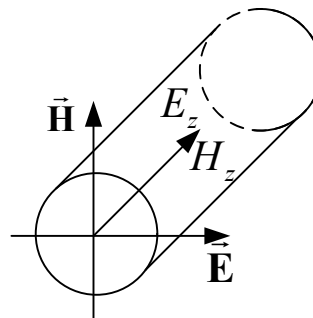
Это электрическая (поперечно-магнитная) волна или ТН волна.



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 поля по периметру и диаметру НСЭ.

Тип обозначается числами:

n – m и n по периметру.

m - min и max по диаметру.

Общее обозначение: HE_{nm} или EH_{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.

Лекция №7

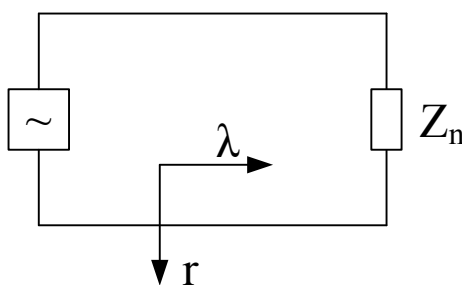
Электромагнитное поле в ближней и дальней зоне

Одним из важнейших параметров в НСЭ является электромагнитная совместимость соседних цепей. НСЭ создаёт внешнее поле, которое является помехой для соседних цепей и кабелей. Кроме того, помехозащищённая цепь может сама быть подвержена электромагнитным влияниям. Поэтому критерию все НСЭ подразделяются на два основных вида: открытые и закрытые.

Закрытые НСЭ

Не создают внешних помех, и сами обладают повышенной защищённостью от внешних и взаимных влияний. К таким НСЭ относят (коаксиальные цепи и кабели, металлические волноводы и волоконные световоды).

Открытые НСЭ.



Симметричные цепи и кабели, ЛПВ и диэлектрические волноводы. В открытых НСЭ наряду с процессом распространения электромагнитной энергии от источника к нагрузке происходят излучения энергии в окружающее пространство. Внешнее пространство, в которое происходит излучение энергии, условно делится на ближнюю и дальнюю зоны, для которых изменяется характер электромагнитного поля.

БЛИЖНЯЯ ЗОНА — это часть пространства, для которого длина передаваемой электромагнитной волны на много больше расстояния до точки наблюдения.

$$\lambda \gg r$$

ДАЛЬНЯЯ ЗОНА — это часть пространства, для которого длина передаваемой электромагнитной волны на много меньше расстояния до точки наблюдения.

$$\lambda \ll r$$

Границей двух зон условно считается расстояние $r = \lambda/6$. Для симметричных цепей $r = 50\text{м}$. Для коаксиальных цепей верхний диапазон 10^8Гц . Граница двух зон в этом случае 50см. Следовательно, все соседние цепи в металлических кабелях связи находятся в ближней зоне для рабочего диапазона частот. В ближней зоне электромагнитное поле носит явно выраженный электрический или магнитный характер, то есть преобладает электрическая или магнитная составляющая. В дальней зоне, начиная с $\lambda/6$ состояние электромагнитного поля выравнивается и оно приобретает вид плоской волны, когда составляющие E и H находятся в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Волновое сопротивление такой волны в свободном пространстве будет равно волновому сопротивлению диэлектрика:

$$\sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

Для ближней зоны преобладание электрической составляющей характерно для цепей, работающих с большими сопротивлениями нагрузки при малых токах и больших напряжениях. В случае преобладания магнитной составляющей в ближней зоне это соответствует работе цепи на малое сопротивление нагрузки при больших токах и малом напряжении. Энергия поля в ближней зоне соответствует величине вектора Пойнтинга, определяемого в ближней зоне.

$$\vec{P}_o = i \frac{I^2 h^2 Z_0 \lambda}{32 \pi^3 r^5}$$

Собственно, вектор Пойнтинга дальней зоны:

$$\vec{P}_d = i \frac{I^2 h^2 Z_0}{8 \lambda^2 r^2}$$

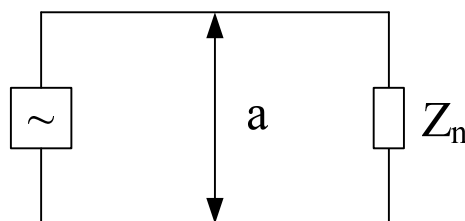
Где I – ток, действующий в цепи, является источником поля, h – длина цепи, λ – длина волны, r – расстояние до точки наблюдения.

Из первой формулы видно, что в ближней зоне электрическое и магнитное поле имеют фазовый сдвиг близкий к 90^0 , а вектор Пойтинга имеет только реактивную составляющую. При этом, основная часть энергии электрического поля сосредоточена около источника излучения. Основная часть энергии поля носит колебательный характер, когда электрическое поле переходит в магнитное и наоборот, а процессы излучения практически отсутствуют. В дальней зоне происходит активное излучение энергии и она переносится на большие расстояния от источника излучения, то есть в ближней зоне энергия «связана источником, не дающим ей распространяться». В дальней зоне энергия теряется, будучи «не связанной с источником».

По соотношению составляющих в ближней и дальней зоне составим таблицу:

<i>Зона</i>	<i>Ближняя</i>	<i>Дальняя</i>
Составляющая инд.	10^{11}	10
Составляющая	10^8	10^4
Составляющая инд./изл.	10^3	$1/10^3$

Таким образом, в ближней зоне эффект индукции в 1000 раз больше эффекта излучения, а в дальней зоне наоборот. В двухпроводных НСЭ эффект передачи и излучения энергии можно связать с расстоянием между проводниками (a). Если $\lambda \gg a$, то преобладает эффект индукции. Если λ соизмеримо с a , то будет резко возрастать эффект излучения и линия превратится из направляющей системы в антенну.



Для ВЛС $a \approx 20$ см, что является ограничивающим фактором для рабочего диапазона частот, потому что для частот $>10^5$ Гц ВЛС превращается в антенну, когда большая часть энергии излучается в окружающее пространство, что приводит к бесполезным потерям энергии и резкому возрастанию затухания.

Уравнения Максвелла для ближней и дальней зоны.

Для дальней зоны $I_{\text{см}} > I_{\text{пр}}$

$$\text{rot} \mathbf{H} = i\omega \epsilon_a \mathbf{E}$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -i\omega \mu_a \mathbf{H}$$

Для ближней зоны

$$\text{rot} \mathbf{H} = 0$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -i\omega \mu_a \mathbf{H}$$

Таким образом, необходимо учитывать распределение электромагнитного поля при создании помехозащищённых НСЭ с малыми потерями.

Пункт 4.7.

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:

РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ	Частота, Гц	Длина волны	Тип волны	Тип НСЭ
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ	$0 - 10^9$	м, км	Т	ВЛС,СК
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ	$10^{10} - 10^{12}$	см, мм	E_{nm} H_{nm}	Волноводы, световоды, ЛПВ
КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ	$10^{13} - 10^{15}$	мкм	НЕ, ТН, 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.

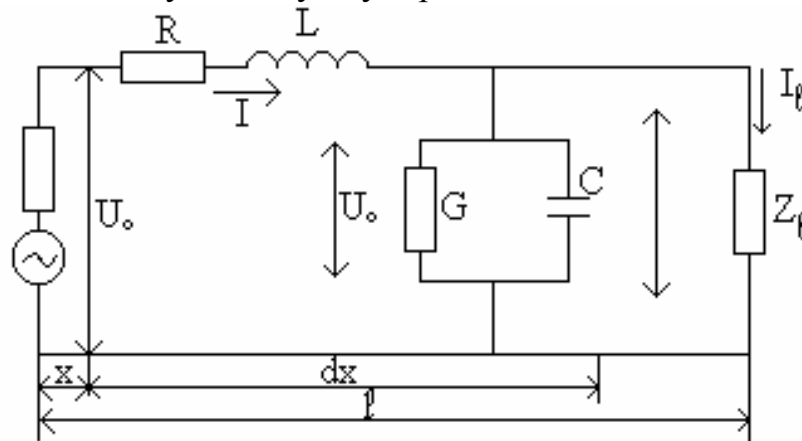
Лекция №8

Пункт 4.8

Уравнения 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:

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

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:

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

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

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

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

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

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

$$I = \frac{Be^{-\gamma x}}{Z_B} - \frac{Ae^{\gamma x}}{Z_B} = U_{nad} + U_{omp}$$

Соотношение между этими волнами будет характеризовать Z_B :

$$\frac{U_{nad}}{I_{nad}} = \frac{U_{omp}}{I_{omp}} = Z_B$$

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: $Z_0 = Z_B = Z_L$. 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:

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

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

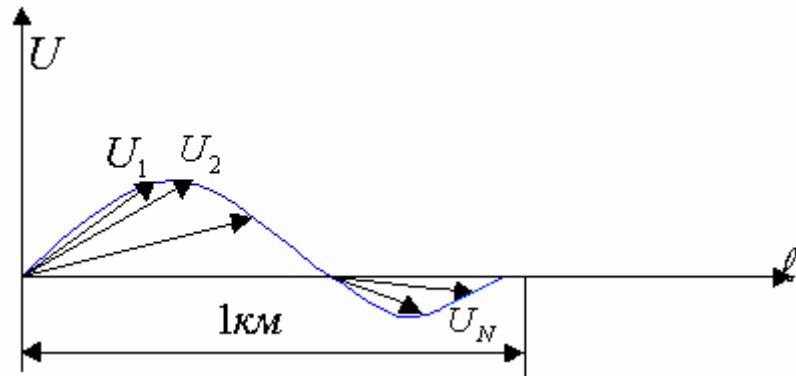
$\alpha \ell$ – затухание линии α

$$1 \text{ Нп} = 8,68 \text{ Дб}$$

$$1 \text{ Дб} = 0,115 \text{ Нп}$$

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.**

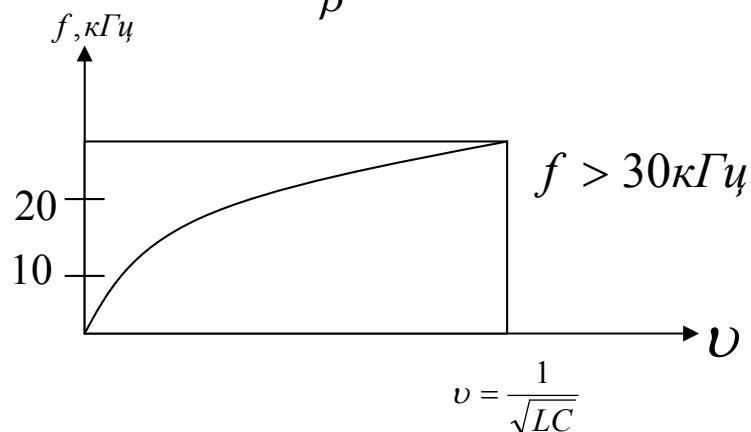
Если рассматривать графически процессы изменения тока и напряжения в линии длиной 1, то такое изменение будет соответствовать уменьшению вектора напряжения по величине и фазе при распространении по линии:



а,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

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

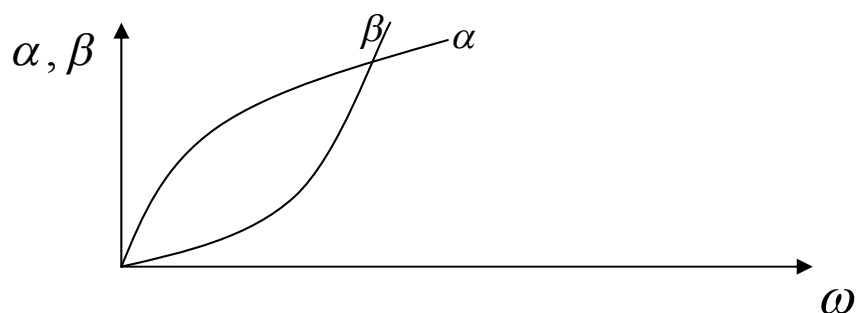
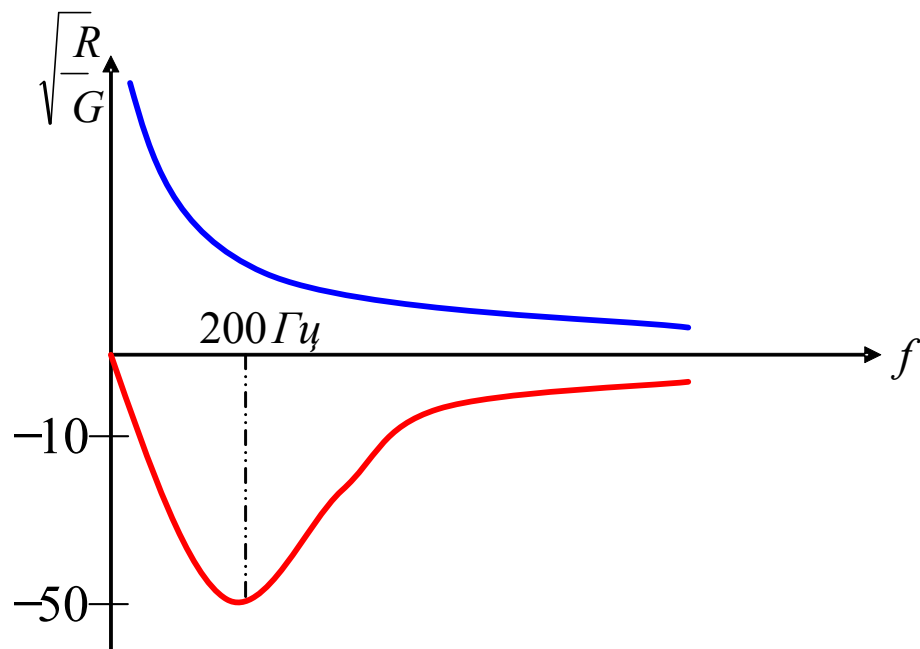


График изменения $|Z_B|$



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

Пункт 4.9

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:

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

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.

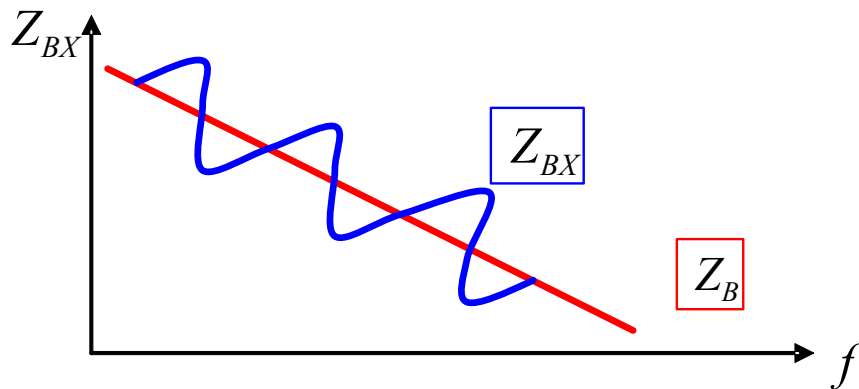
3-затухание за счёт взаимодействия несогласованности в начале и в конце линии.

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:

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

$Z_B^|$ – 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.

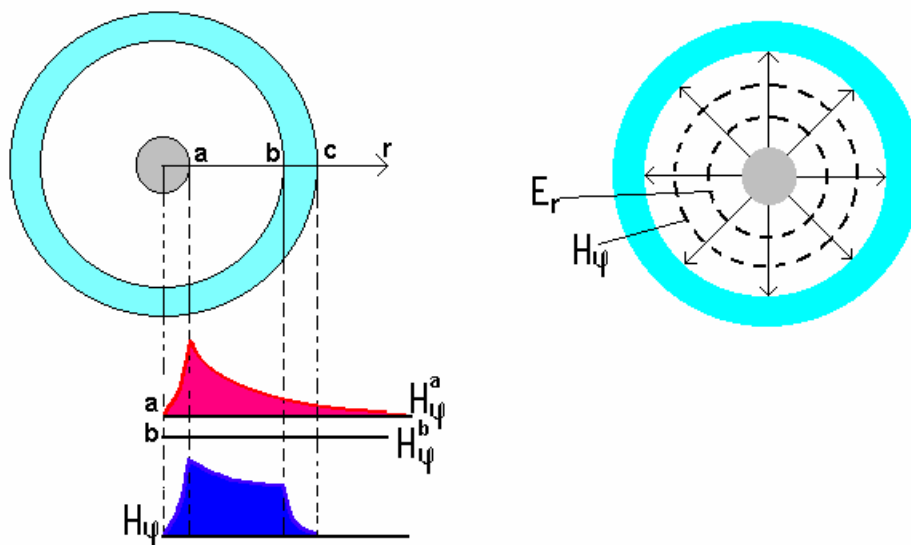
Лекция №9

Теория направляющих систем электросвязи

Пункт 5.1

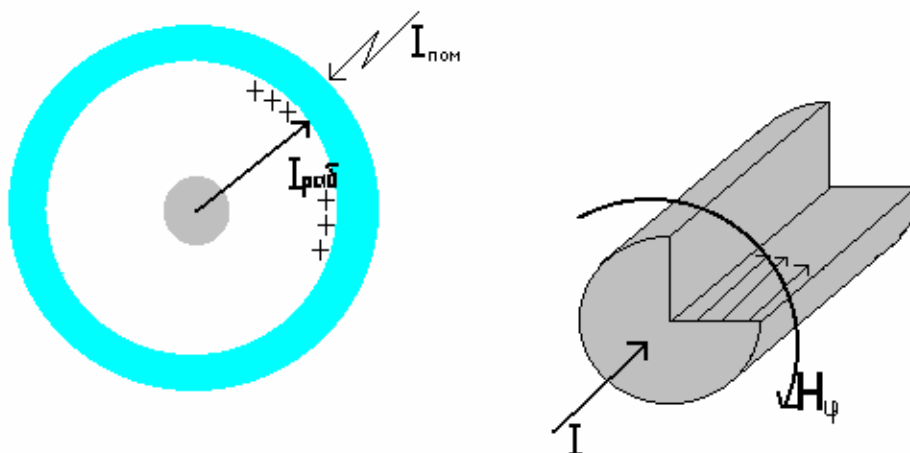
Электрические процессы в коаксиальных цепях

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



Поверхностный эффект является причиной активного сопротивления с ростом частоты.

Рассмотрим проводник а:

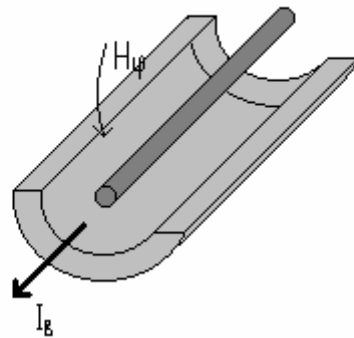


Количественной характеристикой действия вихревых токов является **коэффициент вихревых токов**:

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

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.

Пункт 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:

$$W_z = \Pi_z = \int_0^{2\pi} E_r H_\phi^* r d\phi$$

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:

$$U = \int_{ra}^{r_6} E_r dr, \quad \text{где} \quad E_r = \frac{i\omega\mu_a}{\gamma} H_\varphi$$

Преобразуем выражение E_r :

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

$$U = \int_{r_a}^{r_6} \frac{I}{2\pi r} Z_Z dr = \frac{I}{2\pi} Z_Z \int_{r_a}^{r_6} \frac{dr}{r} = \frac{I}{2\pi} Z_Z \ln \frac{r_6}{r_a}$$

$$Z_6 = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi} Z_Z \ln \frac{r_6}{r_a}$$

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.

Лекция №10

Пункт 5.3

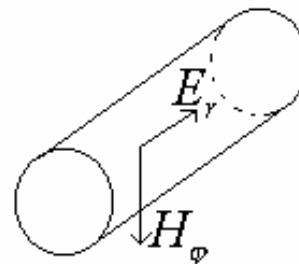
Передача энергии по коаксиальной цепи с потерями

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

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

$$P_k = I^2 Z$$

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



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.

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

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

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

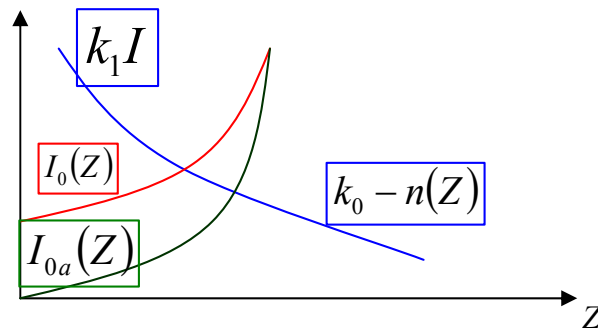
$$\text{решение} : E_z = A I_0(\sqrt{i}kr) + B k_0(\sqrt{i}kr)$$

$k_0(\sqrt{i}kr)$ – функция Бесселя второго рода нулевого порядка

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 непосредственно входит коэффициент вихревых токов коэффициента радиуса проводника γ .

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:

$$E_z = A I_0(\sqrt{i} k r)$$

Из системы уравнений Максвелла можно записать выражение для H_φ :

$$H_\varphi = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{\sqrt{i} k}{i\omega\mu_a} A I_1(\sqrt{i} k r)$$

Но с другой стороны:

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

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

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

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:

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

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

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

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

$$H_\varphi(r_\epsilon) = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{\sqrt{ik}}{i\omega\mu_a} [AI(\sqrt{ikr_\epsilon}) - Bk_1(\sqrt{ikr_\epsilon})] = \frac{I}{2\pi r_\epsilon}$$

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

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

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

для $kr > 5$

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

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

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

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

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

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

Для медных проводников:

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

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

Наряду с внутренней индуктивностью проводников в коаксиальной цепи действует межпроводниковая индуктивность.

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_a}{I} \int_{r_a}^{r_{\text{в}}} \frac{I}{2\pi r} dr = \frac{4\pi 10^{-4} \mu}{2\pi} \ln \frac{r_{\text{в}}}{r_a} = 2 \ln \frac{r_{\text{в}}}{r_a} 10^{-4} \left[\frac{\Gamma_{\text{н}}}{\kappa\text{М}} \right]$$

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

Если внешний проводник сделан из алюминия, то:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \sqrt{f} \left[\frac{4,18}{r_a} + \frac{5,38}{r_{\text{в}}} \right] 10^{-2} \left[\frac{\text{ОМ}}{\kappa\text{М}} \right] \\ L = \left[2 \ln \frac{r_{\text{в}}}{r_a} + \frac{1}{\sqrt{f}} \left(\frac{66,6}{r_a} + \frac{86}{r_{\text{в}}} \right) \right] 10^{-4} \left[\frac{\Gamma_{\text{н}}}{\kappa\text{М}} \right] \end{array} \right.$$

Лекция №11

Пункт 5.4

Емкость и проводимость изоляции коаксиальной цепи

В изоляции двухпроводных цепей происходят два основных процесса:

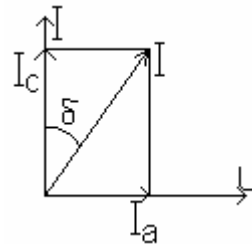
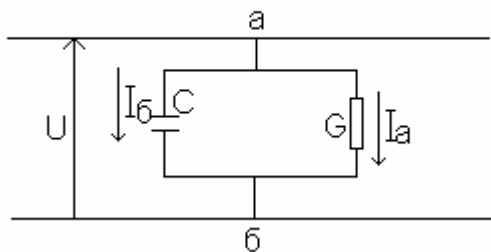
- ✚ Поляризация
- ✚ Переориентация диполей

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



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

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

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

$$G=G_0+G_f=\frac{1}{Ru3}+\omega Ctg\delta$$

$$Ru3>10000MO_{\mathcal{M}}\cdot\kappa\mathcal{M}\Rightarrow\sigma=G_f=\omega Ctg\delta_{\mathfrak{z}}\left[\frac{C_{\mathcal{M}}}{\kappa\mathcal{M}}\right]$$

$$C=\frac{\mathcal{Q}}{U} \quad U=\int\limits_{r_a}^{r_{\mathfrak{z}}}E dr \quad E=\frac{\mathcal{Q}}{2\pi\epsilon_ar}$$

Лекция 12

Пункт 5.5

Первичный и вторичный 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 выражать через конструктивные параметры изоляции.

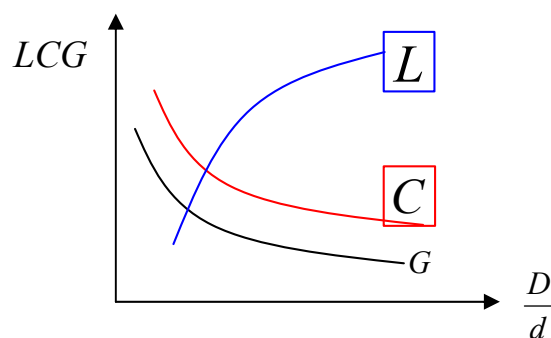
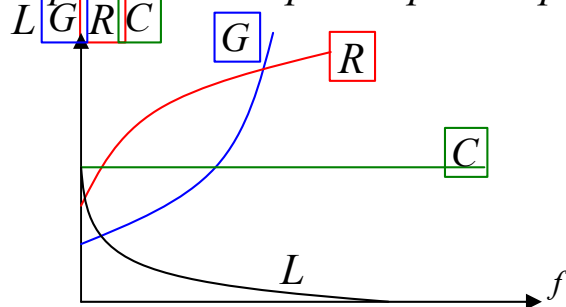
$$\alpha = \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) 8.68 \left[\frac{\text{Дб}}{\text{км}} \right]$$

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

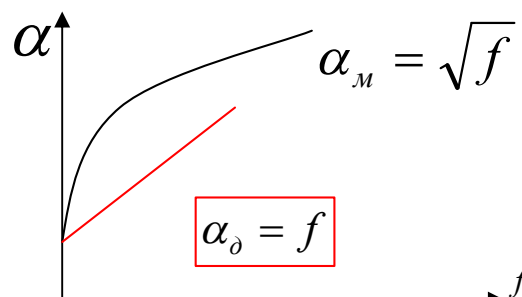
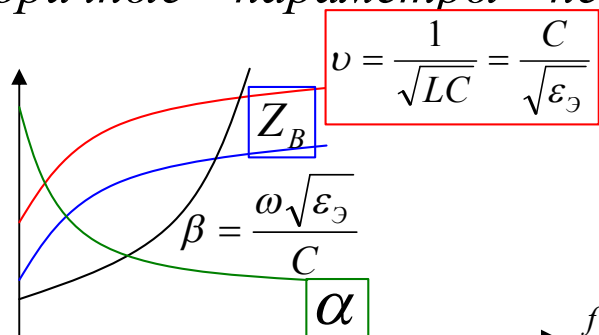
$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \frac{2,6 \sqrt{\varepsilon_3} f}{\ln \frac{D}{d}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) 10^{-3} + 9,1 f \sqrt{\varepsilon_3} \text{tg} \delta_3 10^{-5} \left[\frac{\text{дб}}{\text{км}} \right]$$

Частотные зависимости

первичные параметры передачи



вторичные параметры передачи



Пункт 5.6

Оптимальное соотношение диаметров проводников коаксиальной цепи

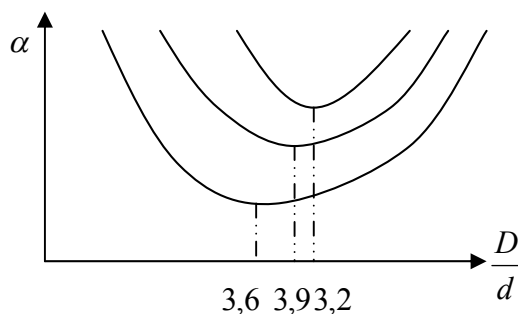
Существует определённое оптимальное отношение диаметров проводников коаксиальной цепи, обеспечивающее минимум затухания.

$$\alpha_{\text{м}} = \frac{2,6\sqrt{\varepsilon_0}f}{l\frac{D}{d}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) 10^{-3}$$

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

Для различных металлов:

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



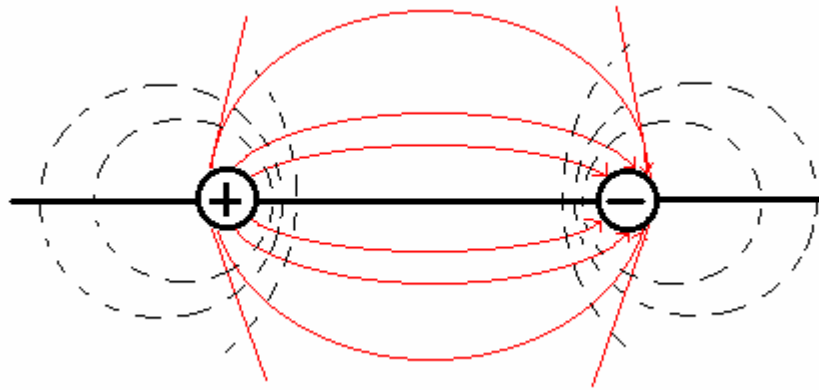
Таким образом, отклонение размера коаксиального кабеля от оптимального наиболее существенным образом сказывается при соотношении меньших оптимальных. Поэтому в реальных цепях с учётом технического допуска соотношение для проводников выбирают несколько большим оптимального.

Лекция №13

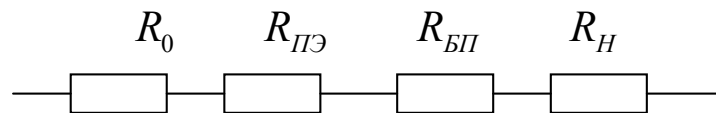
Пункт 5.9

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.

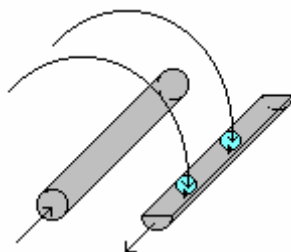
R_0 - сопротивление цепи.

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

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

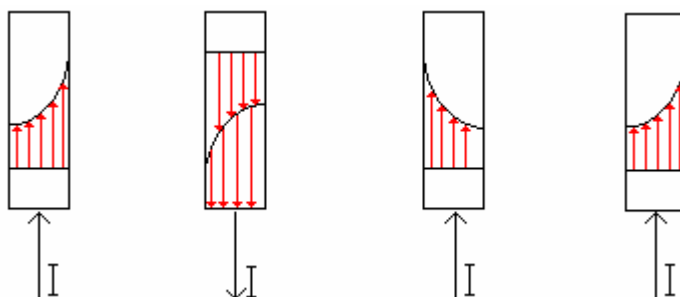
$$\text{сопротивление симметричной цепи} \quad R_0 = \frac{8000\rho}{\pi d_0^2}$$

Возникновение эффекта близости.

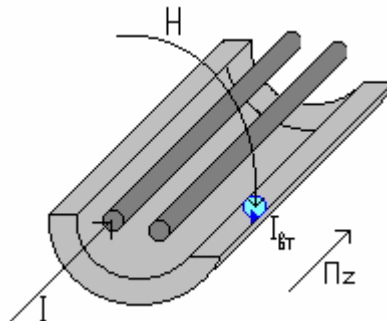


Увеличение сопротивления влечёт за собой увеличение затухания.

Смещение плотности тока в толще проводника.



Наведение вихревых токов ведёт к нагреванию оболочек и экранов.



Лекция №14

Пункт 5.10

Передача энергии по идеальной симметричной цепи

ИДЕАЛЬНОЙ ЦЕПЬЮ будем называть цепь, в которой отсутствуют эффекты, связанные с вихревыми токами, и отсутствует влияние соседних цепей, то есть вся электромагнитная энергия без потерь распространяется вдоль оси Z . И, соответственно, вектор Пойтинга имеет составляющую вдоль оси Z . Согласно теореме Умова-Пойтинга в цилиндрической системе координат:

$$P_Z = \int E_r H_\varphi r d\varphi$$

Таким образом, для нахождения величины вектора Пойтинга мы должны найти составляющие E_r и H_φ . Обратимся для этого к системе уравнений Максвелла:

Как и для коаксиальной цепи, предполагаем экспоненциальное изменение составляющих:

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

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

Где $H_{\varphi 0}$ и E_{r0} – начальные составляющие поля.

Возьмём первые производные по dZ от составляющих поля. Подставим их в исходные уравнения Максвелла:

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

Перемножим уравнения системы между собой:

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

Разделим второе уравнение системы на первое:

$$\left(\frac{E_r}{H_\varphi} \right)^2 = \frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\epsilon_a}$$

Полное сопротивление среды распространения:

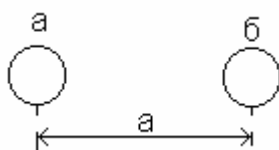
$$Z_Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\varepsilon_a}} = \frac{i\omega\mu_a}{\gamma} = \frac{E_r}{H_\varphi}$$

$$E_r = \frac{i\omega\mu_a}{\gamma} H_\varphi \quad \text{где} \quad H_\varphi = \frac{I}{2\pi r}$$

$$E_r = Z_Z \frac{I}{2\pi r}$$

Для напряжения между проводниками цепи можно записать выражение:

$$U = \int_r^{r-a} E_r dr$$



Подставим E_r :

$$U = \frac{Z_Z I}{\pi} \int_r^{a-r} \frac{dr}{r} = \frac{I}{\pi} \sqrt{\frac{i\omega\mu_a}{\sigma + i\omega\varepsilon_a}} \ln \frac{a-r}{r}$$

Волновое сопротивление цепи:

$$Z_\epsilon = \frac{U}{I} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \ln \frac{a-r}{r}$$

$$\mu_a = 4\pi 10^{-7} \mu \left[\frac{\Gamma_H}{M} \right]$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \varepsilon \left[\frac{\Phi}{M} \right]$$

$$Z_\epsilon = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{a-r}{r} [OM]$$

Из уравнения однородной линии можно записать выражения для продольных параметров:

$$R + i\omega\mu_a = \gamma Z_\epsilon = \frac{i\omega\mu_a}{\pi} \ln \frac{a-r}{r}$$

$$G + i\omega C = \frac{\gamma}{Z_\epsilon} = \pi \left(\frac{\sigma + i\omega\epsilon_a}{\ln \frac{a-r}{r}} \right)$$

Выделяя вещественные и мнимые части, найдём аналитические формулы параметров передачи:

$$R = 0 \quad L = \frac{\mu_a}{\pi} \ln \frac{a-r}{r}$$

$$G = \frac{\pi\sigma}{\ln \frac{a-r}{r}} \quad C = \frac{\pi\epsilon_a}{\ln \frac{a-r}{r}}$$

Пункт 5.11

Передача энергии по симметричной цепи с учётом потерь

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:

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

Согласно закону Джоуля-Ленца:

$$W = I^2 Z$$

$$\Pi_r = W = I^2 Z$$

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

Система уравнений Максвелла для металлических симметричных цепей имеет вид: Преобразуем систему уравнений Максвелла в волновое уравнение для составляющей E_Z :

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

Где K - волновое число среды, для которого известно выражение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \frac{\partial E_Z}{\partial \varphi} = -i\omega\mu_a H_r \\ \frac{\partial E_Z}{\partial r} = i\omega\mu_a H_\varphi \\ \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = (\sigma + i\omega\varepsilon_a) E_Z \end{array} \right.$$

$K^2 = (i\omega)^2 \mu_a \varepsilon_a$ - это квадрат волнового числа. Для диэлектрика он равен нулю на частоте меньше 10^6 Гц. Таким образом для диэлектрика правая часть будет равняться нулю для симметричной цепи. Решением данного волнового уравнения для металла будет выражение:

$$Z_Z = \left[A_n I_n(\sqrt{i}kr) + B_n K_n(\sqrt{i}kr) \right] (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi)$$

Где A_n , B_n , C_n , D_n – постоянные интегрирования, I_n – функция Бесселя первого рода n -го порядка, K_n – функция Бесселя второго рода n -го порядка. Поскольку электромагнитное поле внутри проводника возрастает от центра к поверхности, то поведение функции Бесселя второго рода, имеющей убывающий характер по k , не соответствует физическому смыслу. Поэтому принимаем значение $K_n=0$.

В силу симметричного расположения проводников относительно горизонтальной линии, от которой ведётся отсчёт координаты φ , нечётная функция синуса по координате φ будет отсутствовать, то есть $\sin n\varphi=0$, то есть можно принять: $B_n=0$ и $D_n=0$.

$$\Rightarrow E_z = \sum_{n=0}^{\infty} A_n I_n(\sqrt{ik}r) \cos n\varphi$$

В итоге мы получим множество решений в силу несимметричности поля, каждому из которых соответствует своё значение корня.

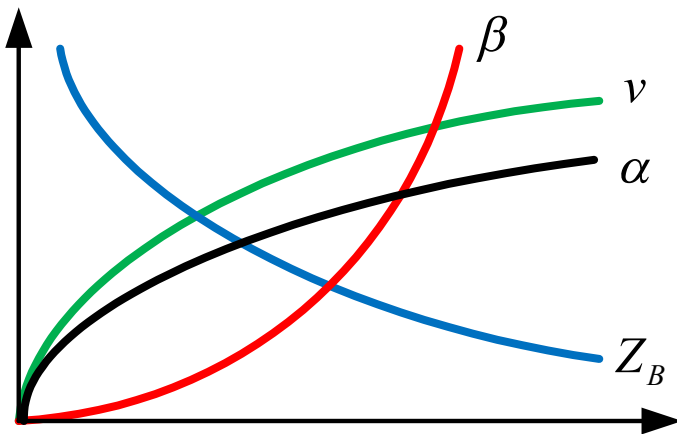
$$H_{\varphi} = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{\sqrt{ik}}{i\omega\mu_a} \sum_{n=0}^{\infty} A_n I'_n(\sqrt{ik}r) \cos n\varphi$$

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:

$$\alpha = \frac{2,6\sqrt{\varepsilon} f \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{a-r}{r}} \left(\frac{1}{2r} + \frac{r}{a^2} \right) + 9,08 \cdot f \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-5}, \left[\frac{\partial B}{\text{км}} \right]$$



$$Z_B = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \ln \frac{a-r}{r}, [Ом]$$

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

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

Лекция №14

Пункт 5.16

Кабели с искусственно увеличенной индуктивностью

Одна из важных проблем — увеличение дальности связи без дополнительного расхода цветных металлов. Для этого совершенствуют аппаратуру, увеличивая ее энергетический потенциал, и стараются уменьшить затухание цепей линий связи.

Как известно вторичные параметры передачи затухания полностью определяются величиной первичных параметров передачи, причем затухание цепи или собственное затухание цепи α определяется как сумма затуханий на частоте выше 30 кГц.

$$\alpha = \alpha_M + \alpha_D = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \left[\frac{Hn}{км} \right]$$

Соотношение между потерями в металле и диэлектрике обычно как 90 к 10%; в высокочастотных коаксиальных цепях как 95 к 5%, поэтому основные усилия по уменьшению затухания следует прилагать к продольным параметрам проводников цепи R и L.

Пусть $x = \sqrt{\frac{RC}{LG}}$ тогда выражение для затухания цепи:

$$\alpha = \sqrt{\frac{RG}{2}} x + \frac{\sqrt{RG}}{2} \frac{1}{x} = \frac{d_0}{2} x + \frac{d_0}{2} \frac{1}{x}$$

Из уравнения однородной линии $\sqrt{RG}$ – затухание на постоянном токе;

Пусть $\sqrt{RG} = \alpha$

$\alpha = \alpha_{\min}$ при $x=1$, т.е. при $RC = LG$

RC=LG – требование минимального затухания

В реальных цепях $x > 1$, так как $RC \gg LG$, особенно в кабельных цепях с большой емкостью.

$L_0 = \frac{RC}{G}$ – соответствует *условию равенства* $RC = LG$

$$\frac{R}{L} = \frac{C}{G} = \frac{\omega_X C \cdot \operatorname{tg} \delta}{C_T} = \omega_X \operatorname{tg} \delta$$

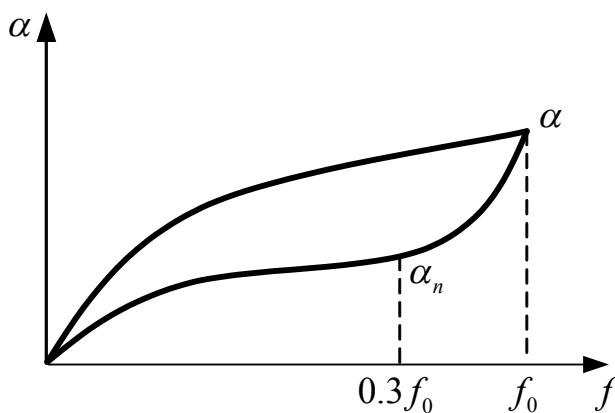
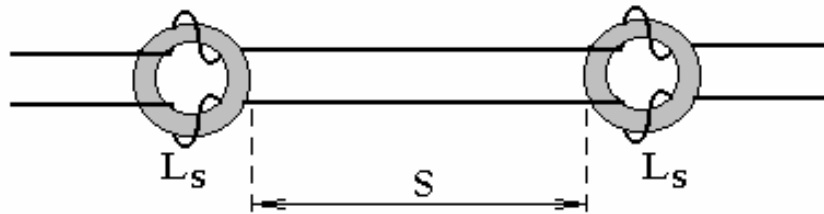
Для симметричных цепей условие минимального затухания автоматически начинает выполняться с ростом частоты до 200 – 600 кГц

$f_K = \frac{\omega_K}{2\pi} = 200 \div 600 \text{ кГц}$ – вторая половина рабочего диапазона,

поэтому возникает необходимость искусственного увеличения индуктивности цепи на более низких частотах, с тем, чтобы обеспечить минимальное затухание во всем рабочем диапазоне частот. Практически это единственная мера уменьшения затухания без увеличения диаметра токопроводящих жил.

Метод пупинизации

При данном методе в цепь включают последовательно *пупинизированные катушки* на расстоянии S (*шаг пупинизации 0,3-1,75 км*).



Предельная частота пупинизации

$$f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{L_{3\phi} C_{3\phi}}}$$

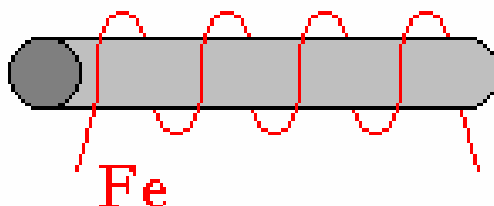
За счет уменьшения затухания пупинизированной цепи можно увеличить длину усилительного участка до 70 – 100 км.

Недостатки пупинизации:

- ✚ Большие габариты катушек за счет большого магнитопровода.
- ✚ Из-за увеличения индуктивности уменьшается скорость передачи, поэтому при дальности свыше 1000 км возникают существенные искажения.
- ✚ На частотах близких к f_0 резко возрастает затухание, и теряются все преимущества. Поэтому пупинизированные цепи имеют ограниченный частотный рабочий диапазон, по которому могут работать системы 24 – 48 канальные, поэтому данный метод широко используется на ведомственных сетях МПС, где мало каналов и большие расстояния.
- ✚ Существуют и другие методы искусственного повышения индуктивности.

Метод крапунизации.

Данный метод состоит в том, что на жилы из меди наматывается провод из стали или пермаллоя.



Габариты цепи и кабеля увеличиваются, возрастают затраты.

Биметаллизация

Создаются биметаллизированные проводники, у которых поверх слоя меди напыляют слой железа 10–20 мкм. Стараются использовать материал Fe с наибольшей магнитной проницаемостью μ .

Использование магнитодиэлектриков для повышения индуктивности цепи

Периодически на проводнике размещаются ферромагнитные кольца которые монтируются в структуру изоляции, при этом резко увеличивается индуктивность цепи.

Недостатки:

-  Хрупкость магнитодиэлектриков
-  Ухудшение свойств изоляции из-за наличия в ней ферромагнитных колец.

Поэтому, более приемлемо выполнение двухслойной изоляции, причем в первый слой изоляции на этапе ее изготовления добавляется порошкообразный магнитодиэлектрик. При этом второй слой изоляции обладает лучшими свойствами и не ухудшает качество изоляции цепи.

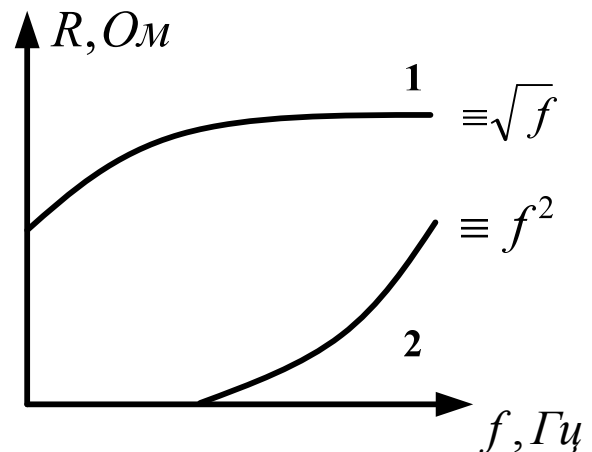
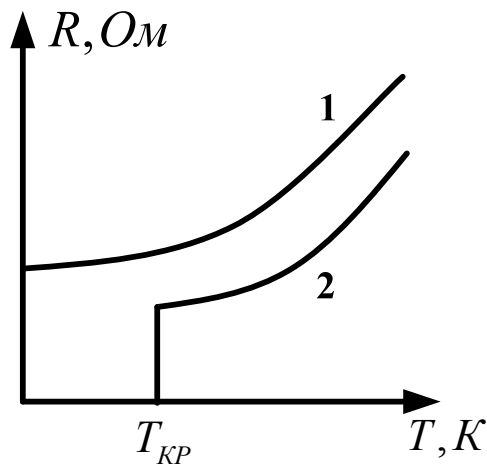
Все указанные методы повышения индуктивности требуют дополнительных технических затрат денежных средств и материала, поэтому используются не часто.

Передача информации по сверхпроводящим кабелям

Как известно, с увеличением температуры возрастает хаотическое движение атомов в кристаллической решетке металлов и сопротивление возрастает, однако если снижать температуру металла до определенного

низкого значения, то в ряде случаев возникает обратный эффект **сверхпроводимости**, при этом прекращается хаотическое движение атомов, а сопротивление металла резко уменьшается. Этим эффектом обладают не все металлы. Его нет у хрома, золота и др. благородных металлов.

Он наблюдается у свинца, тантала, ниобия, цинка и др.



$$T(k) = t_c + 273^\circ$$

$$t(c) = T(k) - 273^\circ$$

Критические температуры для некоторых металлов:

Ниобий	9 К
Свинец	7 К
Тантал	4 К

Цепи из сверхпроводниковых металлов изготавливают коаксиальной конструкции, при этом резко уменьшаются их конструктивные размеры. Диаметр внутреннего проводника – доли миллиметров, внешнего единицы миллиметров.

Электрический расчет параметров СПК

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial r} = k_c E_z \\ H_\varphi = \frac{1}{i\omega \cdot \mu_a} \frac{\partial E_z}{\partial r} \end{array} \right. , \text{ где } k_c = \sqrt{\omega \mu_0 \cdot \sigma_n + \frac{1}{\theta_c^2}}$$

θ_c – глубина проникновения поля в сверхпроводнике

σ_c – удельная проводимость нормальных электронов

Необходимо отметить, что для сверхпроводников принята двухжидкостная теория, согласно которой в сверхпроводниках действуют нормальные (обычные электроны) и сверхпроводящие.

Общее сопротивление коаксиальной цепи

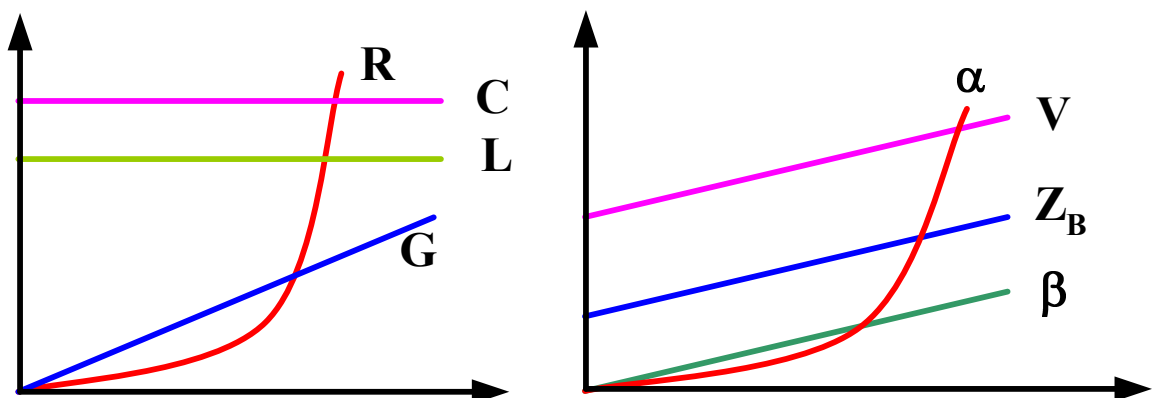
$$Z = Z_a + Z_o = N \frac{i\omega \cdot \mu_0}{\sqrt{i\omega \cdot \mu_0 \sigma_n + \frac{1}{\theta_c^2}}},$$

где N – конструктивные размеры коаксиальной пары: $N = \frac{\left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_o}\right)}{2\pi}$

Все другие первичные параметры коаксиальной цепи СПК не существенно зависят от температуры, поэтому в рассмотрение не принимаются и рассчитываются по обычным формулам для коаксиальной цепи.

Эмпирическая формула для расчета сверхпроводящей цепи:

$$\alpha = \alpha_{ПР} + \alpha_{ДИЭЛ} = 0.05 \cdot f_{ГГц}^2 + 0.5 \cdot f_{ГГц}, \quad \left[\frac{\partial B}{\text{км}} \right]$$



Активное сопротивление СПК значительно ниже обычного

1МГц – в 10^8 раз меньше

1ГГц – в 10^4 раз меньше

При дальнейшем увеличении частоты СПК резко увеличивается пропорционально f^2 и на частотах >10 ГГц СПК теряет все преимущества и его использование на более высоких частотах не целесообразно.

Затухание СПК на частоте 1МГц в 10^6 меньше, чем у обычного кабеля.

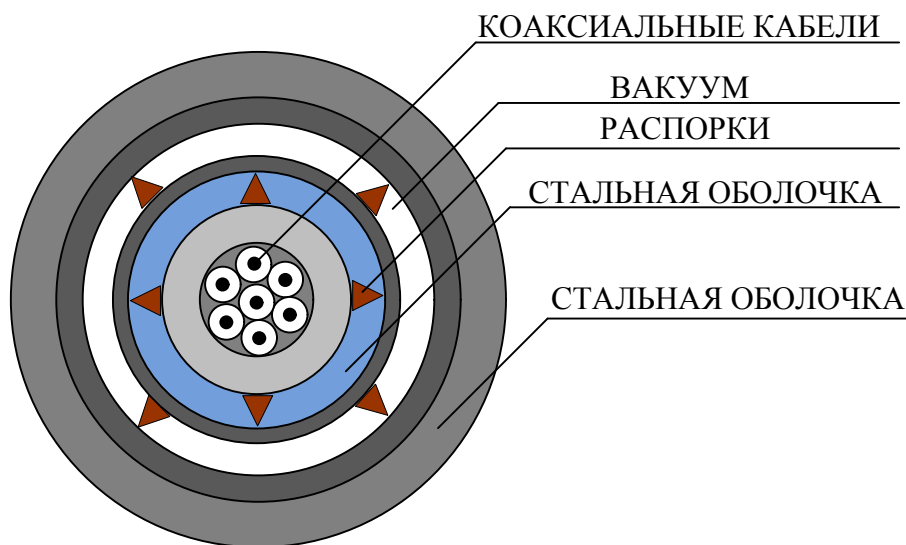
Криогенные устройства СПК

Линия на основе СПК состоит:

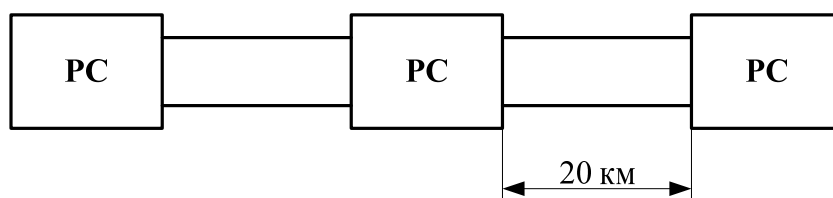
 Электрическая часть (сам СПК коаксиальной конструкции)

 Криогенные устройства, основное назначение которых: обеспечение низких температур по всей длине линии, при которых наблюдается сверхпроводимость.

Криогенная часть состоит из рефрижераторных станций, установленных на расстоянии 20км и обеспечивают подачу **хладагента**, в качестве которой используется жидкий азот, водород или гелий. Азот обеспечивает до 77К, водород до 20К, гелий до 4К. Коаксиальные сверхпроводящие кабели помещаются в систему труб, обеспечивающих прокачку хладагента от рефрижераторных станций на 10–20 км.



Длина регенерационного участка на СПК достигает 100 км и более.



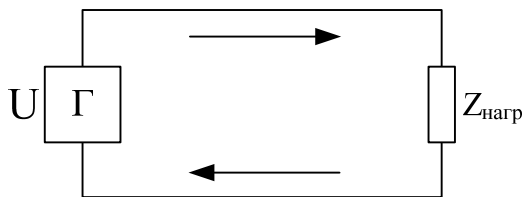
Таким образом, основная проблема установка рефрижераторных станций и обеспечение низких температур. Все это стоит дорого и экономически не эффективно. Однако при объединении в единую конструкцию СПК и силовых

кабелей, работающих на принципе сверхпроводимости, и обеспечивающих передачу мощных потоков энергии становится экономически целесообразно, т.е. электросвязь в данном случае будет выполнять роль технологического компонента при передаче электроэнергии на большие расстояния.

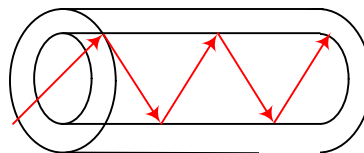
Прошли этапы экспериментальных исследований (немецкие и японские СПК) и с открытием новых типов сверхпроводников на основе металлокерамики работающих при сравнительно высоких температурах в градусах Кельвина. СПК остается одним из направлений развития электросвязи.

Принципы организации связи по двухпроводным НСЭ

Двухпроводная НСЭ

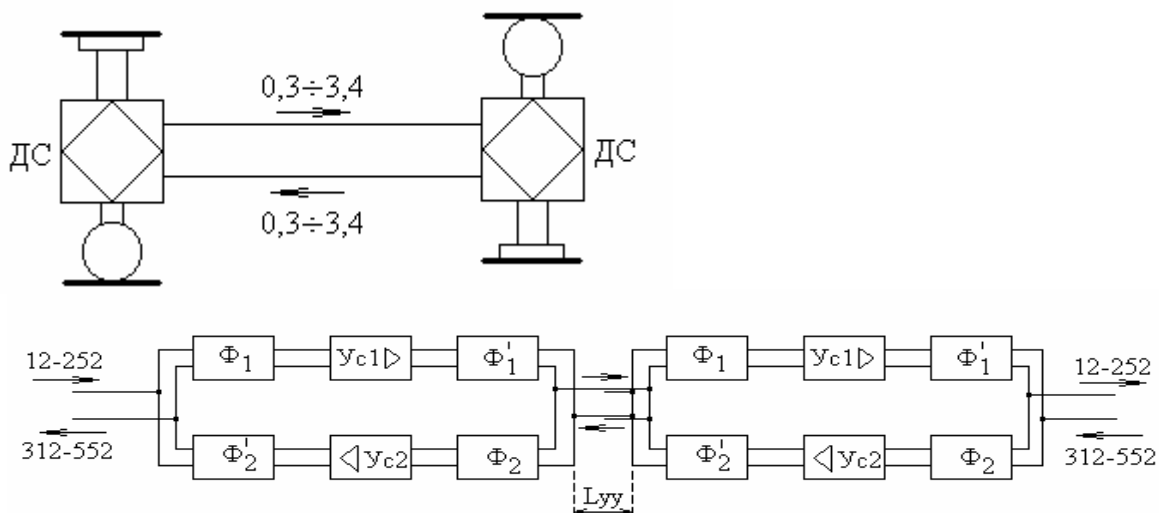


Волновод

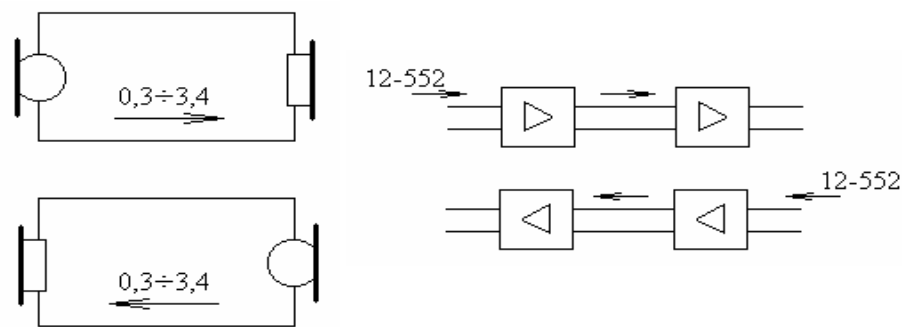


По двухпроводным НСЭ связь организуется по двухпроводной или четырех проводной схеме.

Двухпроводная схема организации связи:



Четырехпроводная схема организации связи:



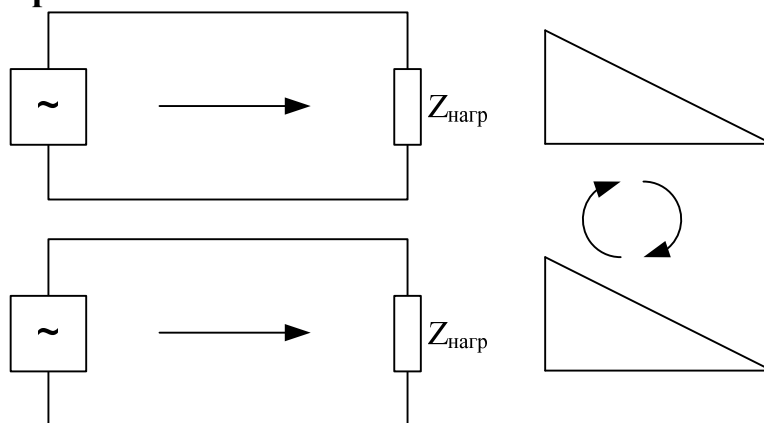
К-60П имеет длину усилительного участка около 20 км. По числу организуемых каналов в двухпроводной схеме ВЧ связи весь спектр передаваемых частот делится на две части: нижнюю и верхнюю. Нижняя часть спектра используется для передачи сигналов в одном направлении, верхняя в другом. Таким образом, двухпроводная ВЧ схема – электрически четырехпроводная. Для разделения цепей передачи в прямом и обратном направлениях и предотвращения авто генерации усилителей на их входе и выходе ставятся разделительные фильтры, пропускающие только соответствующий спектр частот (Φ_1 и Φ_1^1 – 12 – 252); (Φ_2 и Φ_2^1 312 – 552кГц). Наличие фильтров в схеме приводит к искажениям передаваемых сигналов и уменьшает дальность связи за счет ограничения коэффициента усиления применяемых усилителей. Устойчивость у двухпроводной схемы ниже, чем у четырехпроводной, так как различные температурные и временные изменения приводят к изменениям параметров фильтров и усилителей, а значит, увеличивается опасность самогенерации усилителей в схеме.

По сравнению с двухпроводной ВЧ схемой четырех проводная схема не требует разделительных фильтров, позволяет организовать в 2 раза большее число каналов. При этом повышается устойчивость связи и упрощается оборудование системы передачи за счет исключения фильтров. При этом можно использовать усилители с большим коэффициентом усиления и работать на большие расстояния без переприема.

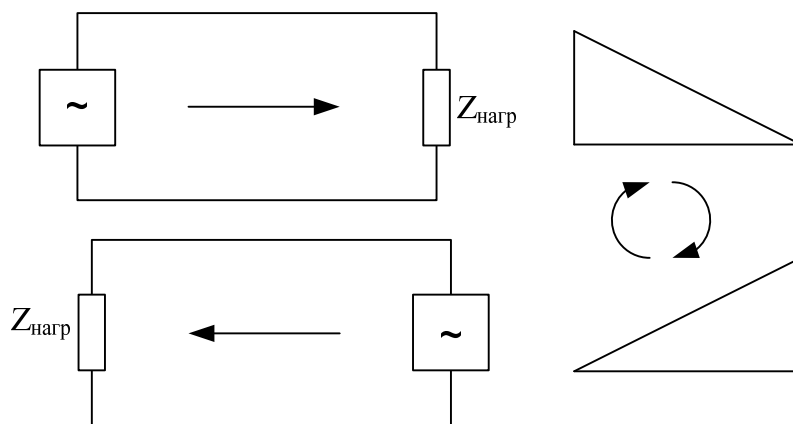
Исходя из затрат цепей кабелей связи двухпроводные и четырех проводные ВЧ схемы **равнозначны**. Если имеется удвоенное количество цепей, то при четырех проводной схеме можно организовать такое же количество каналов, что и при двухпроводной, используя в 2 раза меньший рабочий спектр частот, что особенно важно для симметричных цепей, имеющих ограниченный рабочий диапазон частот, так как снижается верхняя рабочая частота в 2 раза, то уменьшается и затухание цепи. За счет этого возрастает длина усилительного участка. Таким образом, более выгодной оказывается четырех проводная схема, как по дальности, так и по устойчивости работы.

Различают *два основных режима передачи* по двухпроводным НСЭ.

1. Совпадающий режим



2. Встречный режим



Анализ режимов передачи показывает, что в наихудших условиях по помехозащищенности находится встречный режим передачи, так как высокий уровень передачи одной цепи воздействует на соседнюю цепь с малым уровнем сигнала и создает в ней мощную помеху соизмеримую с уровнем сигнала в этой цепи.

Если режим передачи в соседних цепях совпадает, то энергия распределяется с одинаковым уровнем и помеха намного меньше.

В **двухпроводной** ВЧ схеме связи – соседние цепи находятся в **совпадающем** режиме передачи, а при **четырёхпроводной** – в **встречном** режиме.

По помехозащищенности двухпроводная схема лучше.

Для повышения помехозащищенности схем ВЧ связи и устранения режима встречной передачи организуют двух кабельную систему связи.

Когда все цепи с большим уровнем передачи в одном направлении объединяются в одном кабеле, а в обратном направлении в другой.

Все системы передачи аналоговые и цифровые по симметричным не экранированным цепям работают по четырехпроводной схеме и двухкабельной системе.

Все коаксиальные кабели обеспечивают повышенную помехозащищенность цепей вследствие эффекта самоэкранирования, поэтому для коаксиальных цепей используется четырехпроводная схема организации связи и однокабельная система связи, т.е. все цепи передачи и приема находятся в одном кабеле. В воздушных линиях физически невозможно обеспечить разделение цепей передачи и приема по различным линиям, поэтому на ВЛС используется двухпроводная схема организации связи по одной линии.

Организация связи по двухпроводным НСЭ.		
Тип двухпроводной НСЭ	Схема связи	Система организации связи
ВЛС	Двухпроводная	По одной линии
СК	Четырехпроводная	Двухкабельная
СК с экранированными цепями	Четырехпроводная	Однокабельная
КК	Четырехпроводная	Однокабельная

Лекция №15

Пункт 5.12

Волновое уравнение для диэлектрика в симметричной цепи

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

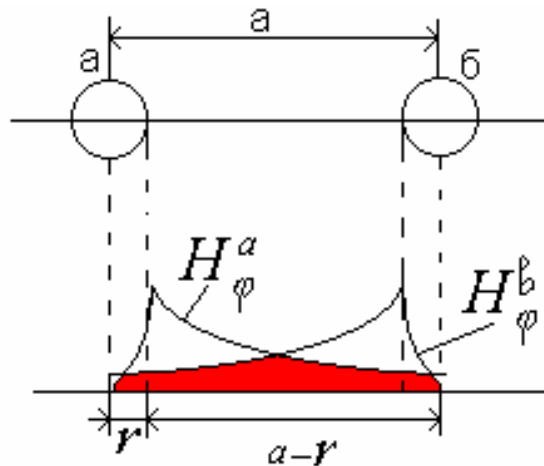
Решением для данного волнового уравнения будет выражение:

$$E_z = B_0 \ln r + C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n r^n + C_n r^{-n}) \cos n\varphi$$

Где B_0 и C_0 – постоянные интегрирования при $n=0$, B_n и C_n – постоянные интегрирования при n , не равном нулю.

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:

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ для нахождения постоянных интегрирования.

1. На границе проводник/диэлектрик продольные составляющие электрического поля непрерывны.
2. На границе металл/диэлектрик тангенциальные составляющие электрического поля непрерывны.
3. Согласно закону возрастания и убывания магнитного поля в качестве граничного условия можно записать:

$$H_\varphi^a(\text{на расстоянии } a) = H_\varphi^b(\text{на расстоянии } b)$$

4. Выполняется закон полного тока для координаты r магнитного поля

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

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

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

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

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

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

Внутренняя индуктивность симметричной цепи:

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

Полное активное сопротивление симметричной цепи:

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

Где χ – коэффициент скрутки цепи. Он характеризует линейное удлинение проводников при их скрутке по сравнению с длиной цепи. В зависимости от шага скрутки $\chi=1,01...1,07$. 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 $P=5$.

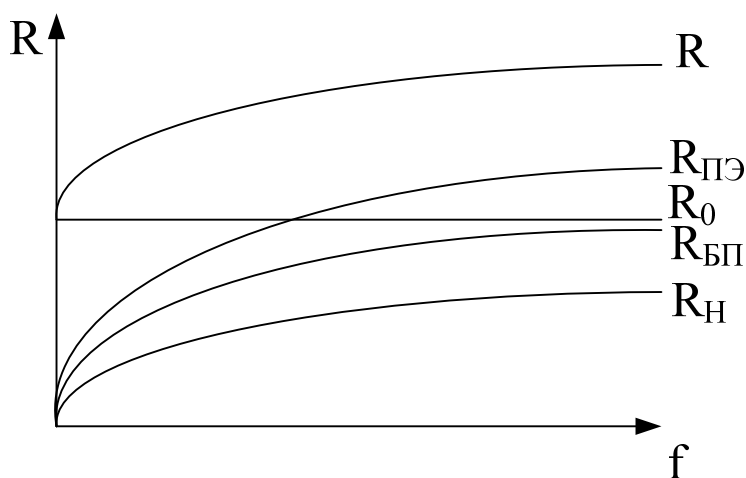
Величина потерь в окружающих металл массах рассчитана на частоте 200кГц и сведена в таблицу для рассчитанных значений сердечника кабеля.

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.

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

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

Графики изменения активного сопротивления:



Пункт 5.13

Ёмкость и проводимость изоляции симметричной цепи

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:

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta_{\vartheta} = G_0 + G_f$$

$$G_0 = \frac{1}{R_{uz}} \quad G_f = \omega C \operatorname{tg} \delta_{\vartheta}$$

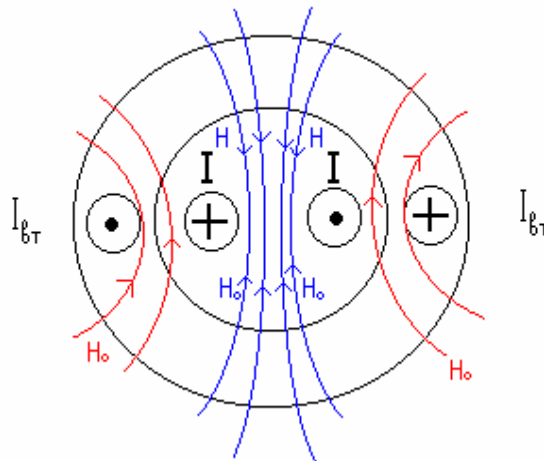
Лекция №16

Пункт 5.14

Параметры симметричных экранированных цепей

Так как симметричные цепи – открытые цепи, то с ростом частоты резко падает помехозащищённость соседних цепей, поэтому для повышения помехозащищённости экранируют отдельные элементарные кабельные группы, или весь сердечник. **Все кабели со стальной гофрированной оболочкой имеют под ней экран из алюминия.**

Структура магнитного поля экранированной цепи.



Магнитные поля симметричных экранированных цепей искажаются за счёт действия отражённого магнитного поля, причём в пространстве между проводниками основное и отражённое поле взаимно компенсируются. Поэтому активное сопротивление экранированной цепи может оказаться меньше активного сопротивления неэкранированной цепи за счёт уменьшения сопротивления из-за эффекта близости. Для оптимизации конструкции экрана стараются создать такие условия, чтобы сопротивление за счёт эффекта близости оказалось равным сопротивлению за счёт реакции экрана. В этом случае сопротивление экранированной цепи будет зависеть только от эффекта потерь в экране и потерь на вихревые токи в проводниках.

В общем виде сопротивление экранированной цепи:

$$R_{лэ} = \frac{4r_э^2 a^2}{r_э^4 - a^4} = 0$$

Под a понимают половину расстояния между центрами проводников цепи, r – радиус по внутренней поверхности экрана.

Сравнивая данное выражение с формулой для обычной цепи, приходим к выводу:

Радиус экрана должен быть удвоен по сравнению с расстоянием между центрами проводников.

Сопротивление потерь:

если $k_{\vartheta} t_{\vartheta} = \sqrt{\omega \mu_a \sigma_{\vartheta} t_{\vartheta}} \leq 0,5$ то :

$$R_{\vartheta} = 8R_{0\vartheta} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\frac{a}{r_{\vartheta}^2} \right) \frac{k_{\vartheta}^4 r_{\vartheta}^2 t_{\vartheta}^2}{k_{\vartheta}^4 r_{\vartheta}^2 t_{\vartheta}^2 + 4\pi^2} \left[\frac{Ом}{кМ} \right]$$

$$R = R_0 \chi \left[1 + F(kr_0) + \frac{PG(kr_0) \left(\frac{r_0}{a} \right)^2}{1 - H(kr_0) \left(\frac{r_0}{a} \right)^2} \left| 1 - 4 \frac{a^2 r_{\vartheta}^2}{r_{\vartheta}^4 - a^4} \right| \right] + R_{\vartheta} \left[\frac{Ом}{кМ} \right]$$

$$R_{0\vartheta} = \frac{10^3}{2\pi r_{\vartheta} t_{\vartheta} \sigma_{\vartheta}}; \quad \frac{Ом}{кМ}$$

σ_{ϑ} - удельная проводимость, t_{ϑ} - толщина, r_{ϑ} - радиус проводника по внутренней поверхности.

При условии $k_{\vartheta} t_{\vartheta} = 0,5 \div 3$ средние частоты:

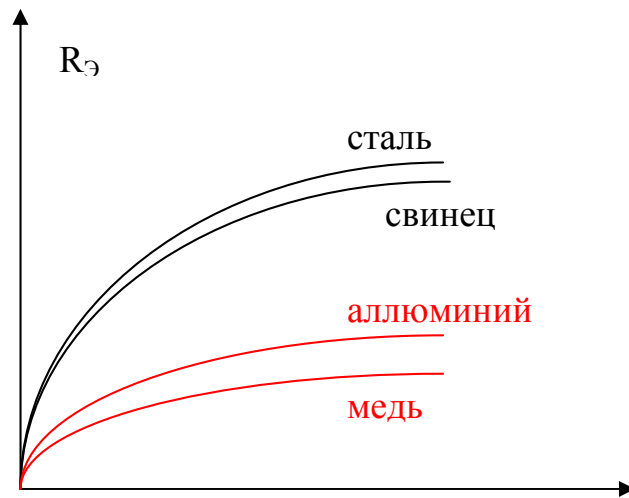
$$R_{\vartheta} = 8Z_{MA} \frac{10^6}{2\pi r_{\vartheta}} \frac{a^2 r_{\vartheta}^2}{r_{\vartheta}^4 - a^4} \frac{sh\sqrt{2}k_{\vartheta}t_{\vartheta} + \sin\sqrt{2}k_{\vartheta}t_{\vartheta}}{ch\sqrt{2}k_{\vartheta}t_{\vartheta} + \cos\sqrt{2}k_{\vartheta}t_{\vartheta}}$$

$Z_{MA} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}}$ - активная составляющая волнового сопротивления металла

$k_{\vartheta} t_{\vartheta} > 3$

$$R_{\vartheta} = 8Z_{MA} \frac{10^6}{2\pi r_{\vartheta}} \frac{a^2 r_{\vartheta}^2}{r_{\vartheta}^4 - a^4}; \quad \frac{Ом}{кМ}$$

Параметры экранированной цепи



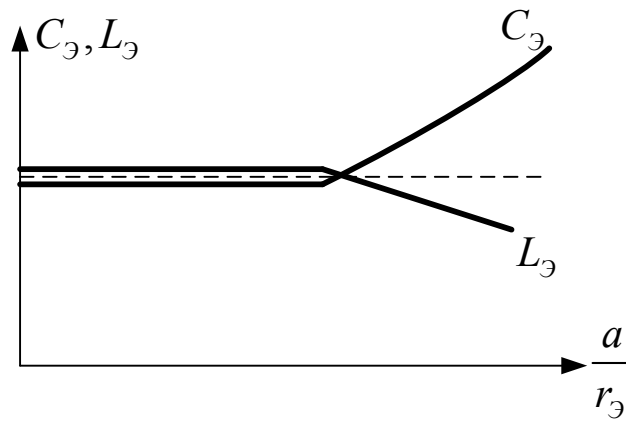
$$L_{\text{э}} = \left[\overbrace{4 \ln \frac{2a - r_0}{r_0} \frac{r_{\text{э}}^2 - a^2}{r_{\text{э}}^2 + a^2}}^{\text{межпроводная индуктивность}} + \underbrace{\mu Q(kr_0)}_{\text{внутренняя индуктивность}} \right] 10^{-4}; \quad \frac{\Gamma_{\text{н}}}{\text{км}}$$

$L_{\text{э}} < L_{\text{нэ}}$

Из-за компенсации магнитного поля в межпроводниковом пространстве у экранированной цепи уменьшается.

$$C_{\text{э}} = \frac{\chi \varepsilon_{\text{э}} 10^{-6}}{36 \ln \frac{2a}{r_0} \frac{r_0^2 - a^2}{r_{\text{э}}^2 - a^2}}; \quad \frac{\Phi}{\text{км}} \quad C_{\text{э}} > C_{\text{нэ}}$$

$$C_T = \omega C_V \operatorname{tg} \delta_{\text{э}} \quad \frac{C_M}{\text{км}}$$



Пункт 5.15

Параметры передачи ВЛС

В отличие от кабельных симметричных цепей в ВЛС нет заметного искажения электромагнитного поля за счет взаимодействия полей соседних

проводников, т.е. для ВЛС выполняется условие $\frac{a}{r} \geq 50$

r – радиус проводников.

Для таких условий система уравнений Максвелла будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} = k^2 E_z \\ H_\varphi = \frac{1}{i\omega\mu_a} \frac{\partial E_z}{\partial r} \end{array} \right.$$

для соотношения $\frac{a}{r} = 50 \quad \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = 0$

$$R = 2R_0[1 + F(kr)] \quad \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$L = \left[4 \ln\left(\frac{a}{r}\right) + \mu Q(kr) \right] 10^{-4} \quad \frac{\text{Гн}}{\text{км}}$$

$$C = \frac{10^{-6}}{36 \ln \frac{a}{r}} \frac{\Phi}{\text{км}}$$

Проводимость изоляции ВЛС существенно зависит от погодных условий, при этом составляющей проводимости изоляции на постоянном токе пренебречь уже нельзя.

$$C_T = C_{T0} + nf \frac{C_M}{\text{км}}$$

Расчетные эмпирические формулы:

C_{T0} – величина обратная сопротивлению изоляции

$C_{T0} = 10^{-8} \text{См/км}$ для сухой погоды

$N = 5 \cdot 10^{-11}$

$C_{T0} = 5 \cdot 10^{-8} \text{См/км}$ для сырой погоды

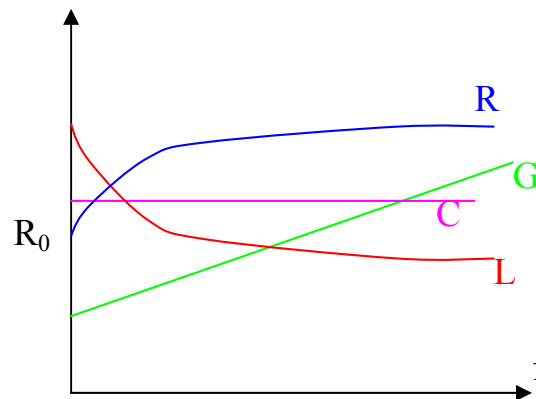
Таким образом, ВЛС используется для передачи только ограниченного спектра частот, так как проводники ВЛС стальные и на частотах более 100-150 кГц резко возрастает активное сопротивление из-за поверхностного эффекта.

Кроме того параметры передачи ВЛС существенно зависят от погодных условий.

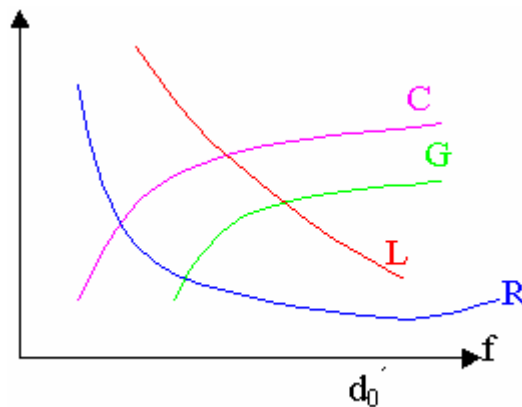
Лекция №17

Основные зависимости первичных параметров передачи симметричных цепей.

Зависимость от частоты первичных параметров:

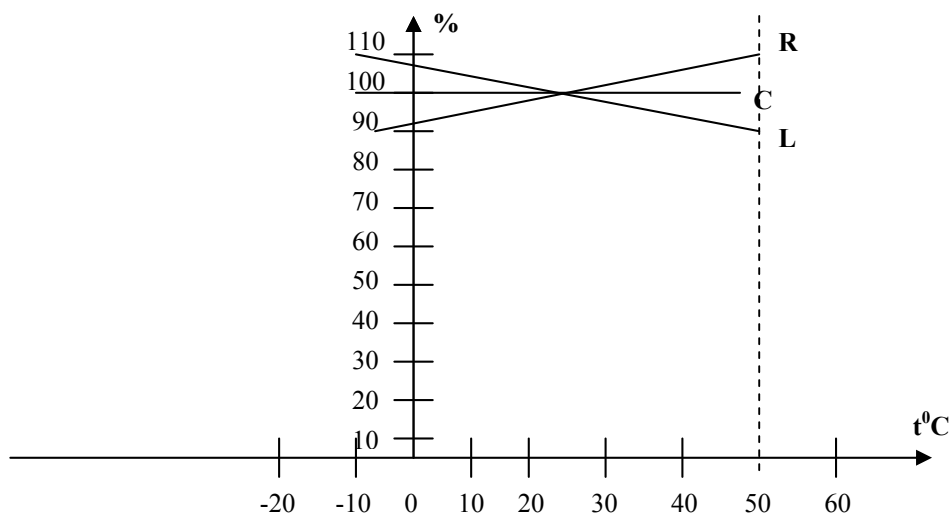


Зависимость первичных параметров от диаметра проводников:



- ✚ Т.к. сечение увеличивается, то R уменьшается, но с некоторого диаметра резко увеличивается эффект близости и потери в соседних проводниках, поэтому R начинает возрастать.
- ✚ Емкость возрастает из-за сближения проводников.
- ✚ Проводимость возрастает из-за увеличения емкости.
- ✚ Индуктивность уменьшается за счет уменьшения межпроводниковой индуктивности, т.к. уменьшается площадь между проводниками, охватываемая магнитным потоком.

Температурная зависимость первичных параметров



Вывод: Наиболее существенным изменениям в реальном диапазоне температур подвержено активное сопротивление. Увеличение активного сопротивления с ростом температуры связано с тем, что возрастает хаотическое движение атомов в узлах кристаллической решетки металла и увеличиваются тепловые потери из-за соударения электронов при протекании тока в проводнике.

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha_R(t - 20)], \quad \frac{Ом}{КМ}$$

$$\alpha_R = 0,004 \quad \text{— медь,}$$

$$\alpha_R = 0,003 \quad \text{— алюминий}$$

$$\alpha_R = 0,0046 \quad \text{— сталь}$$

$$R_{ИЗОЛЯЦИИ} = R_{ИЗ}^{(20^0 C)} e^{-\alpha_{ИЗ}(t-20)^0 C} \quad \frac{МОм}{КМ}$$

$$\alpha_{ИЗ} = 0,06 \quad \text{— бумага,}$$

$$\alpha_{ИЗ} = 0,001 \quad \text{— стирофлекс}$$

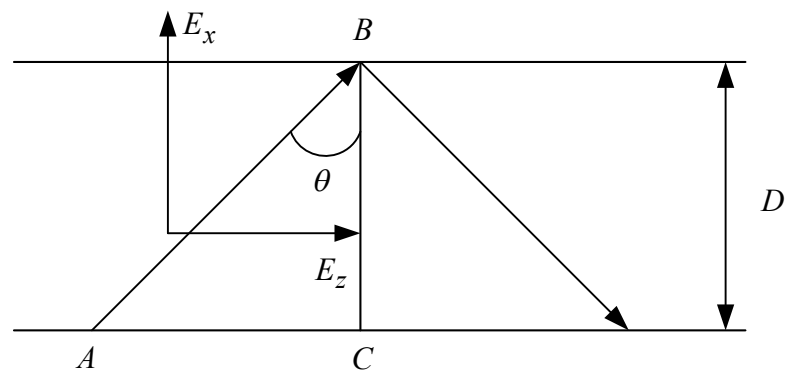
Лекция 22.

Волноводы, физические процессы в них и параметры передачи

Волновод – это средство сосредоточения электромагнитной энергии в определенном пространстве и передача ее в заданном направлении.

Классический волновод – это полая металлическая конструкция, внутри которой, периодически отражаясь от стенок волновода, распространяется электромагнитная волна определенной конфигурации. Отличие в распространении электромагнитной волны в волновод по сравнению с распространением в свободном пространстве, заключается в жестко направленном варианте прохождения электромагнитной волны. Например: от передатчика по антенно-фидерному тракту волноводной конструкции до антенны.

Рассмотрим процесс распространения электромагнитной волны в волновод.



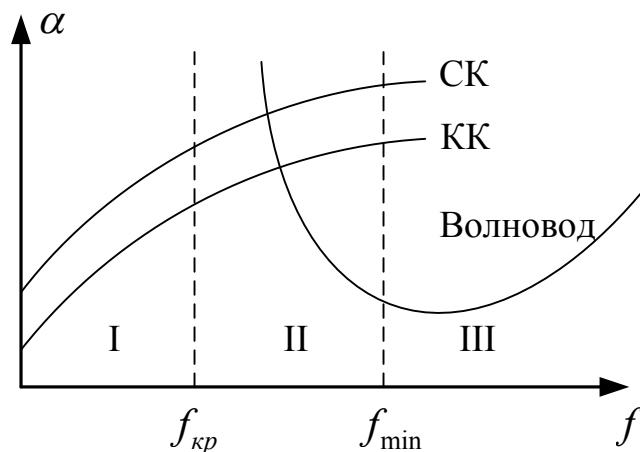
На ВЧ $E_x < E_z \Rightarrow \theta \rightarrow 90^\circ, \lambda \rightarrow 0; f \rightarrow \infty$.

На НЧ $E_x > E_z \Rightarrow \theta \rightarrow 0^\circ, \lambda \rightarrow D; f \rightarrow f_{кр} = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{D}$.

$D = 6 \text{ см}; \lambda \leq 6 \text{ см}$.

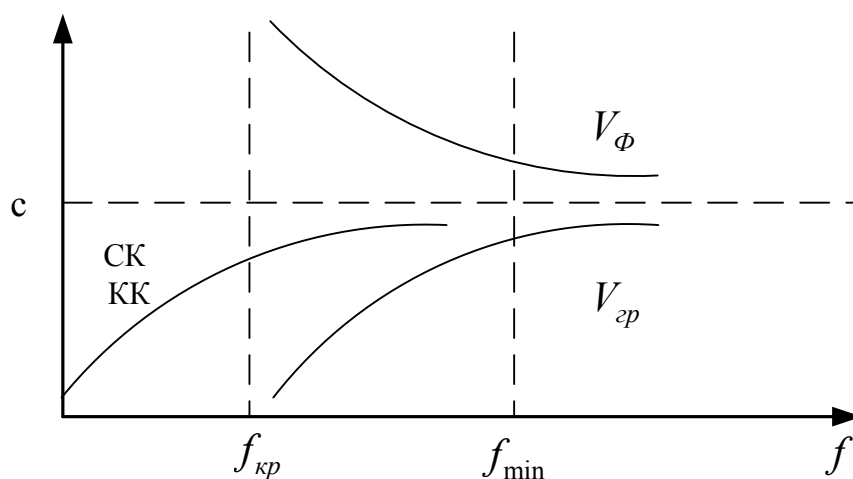
Частота, при которой наступает режим стоячей волны, называется критической частотой волновода. Она соответствует длине электромагнитной волны, равной диаметру волновода. Таким образом, по любому волноводу невозможна передача электромагнитной волны с длиной волны большей диаметра волновода, т.е. волновод является фильтром верхних частот.

Рассмотрим параметры металлического волновода по сравнению с параметрами НСЭ.



Для волновода в I области затухание равно бесконечности. Во II области с возрастанием частоты уменьшается количество переотражений от стенок волновода, поэтому затухание уменьшается. Начиная с $f_{\min}$, начинает превалировать процесс поглощения энергии в стенках волновода за счет действия вихревых токов, т.е. тепловые потери начинают доминировать над процессом уменьшения затухания из-за меньшего числа переотражений.

Скорость распространения электромагнитной волны в волноводе можно разделить на фазовую и групповую.



В волноводах распространяются электромагнитные волны высших порядков.

Электрические – E_{nm} , магнитные – H_{nm} волны. Соответственно, продольными составляющими этих волн будут E_z и H_z . Конструктивно волноводы могут быть прямоугольного, эллиптического или круглого сечения. Наиболее часто волноводы выполняются с круглой формой. Для круглых волноводов n – число полных изменений поля по окружности волновода, m – число изменений поля по диаметру волновода. Для прямоугольных волноводов n – число изменений поля вдоль меньшего размера волновода, m – число изменений поля вдоль большего размера волновода. Параметрами передачи волновода являются: критическая длина волны и частота, коэффициент затухания и фазы, групповая и фазовая скорость распространения, волновое сопротивление.

Большинство данных параметров можно найти из решений уравнения Максвелла для соответствующих граничных условий. Согласно этим решениям для круглого волновода критическая частота:

$$\begin{aligned} n_1 > n_2 &\Rightarrow \theta_2 > \theta_1 \\ \theta_1 &= \theta_0 \end{aligned} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi a}{P_{nm}},$$

где P_{nm} – корни функций Бесселя решения соответствующих уравнений, c – скорость света, a – внутренний радиус волновода.

Затухание для электрической волны:

$$\lambda^E = \frac{Z_{ma}}{Z_\partial} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}} \cdot 8,68 \text{ дБ / км}, Z_{ma} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \text{ — активная часть волнового сопротивления металла стенок волновода.}$$

$$Z_\partial = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = 376,7 \text{ Ом} \text{ — волновое сопротивление воздуха.}$$

Для магнитной волны

$$\alpha^{Hn} = \frac{Z_{ma}}{Z_\partial} \frac{\left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}} \quad \beta = k_c \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}, \text{ где}$$

$$k_c = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \text{ — волновое число среды}$$

Фазовая скорость

Групповая скорость

Волновое сопротивление

$$V_\phi = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}} \quad V_{гр} = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2} \quad Z_\partial^H = Z_\partial / \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}$$

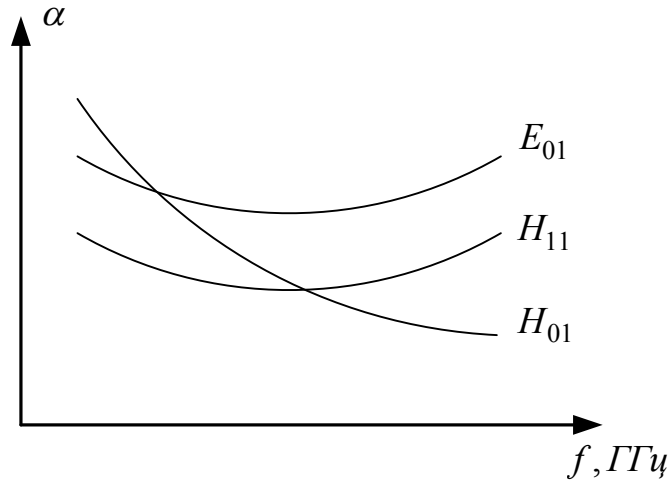
$$Z_\partial^E = Z_\partial \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f}\right)^2}$$

D=6см; $\lambda=3\div 10$ мм; $f=30\div 100$ ГГц; $\Delta f=70$ ГГц;
 $\alpha=2\div 3$ дБ/км; $l_{yy}\approx 20$ км; $N_{кан}=100\div 200$ т

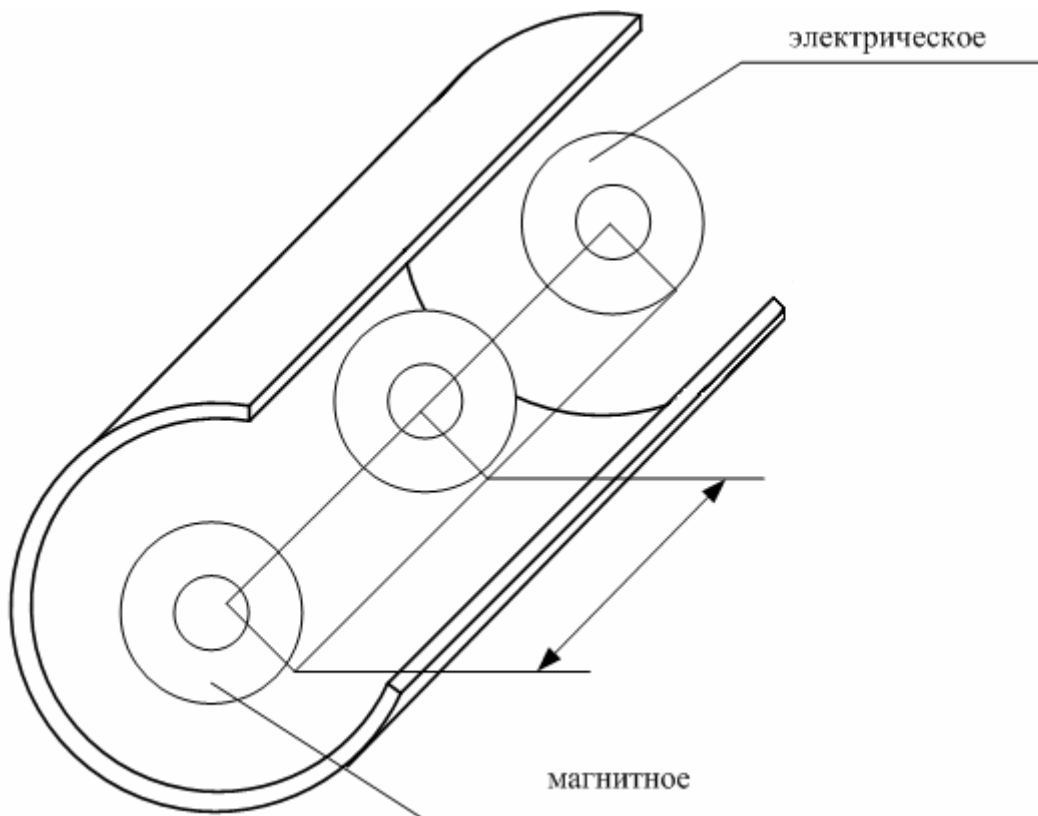
Но металлические волноводы экономически не выгодны для работы на больших расстояниях.

Особенности волны H_{01} в круглых волноводах.

Для данной волны наблюдается аномальный характер изменения затухания в круглых волноводах. С ростом частоты затухание для H_{01} монотонно уменьшается. Это объясняется тем, что все типы волн кроме H_{01} имеют электрическое поле, линии которого замыкаются в стенках волновода.



Для волны H_{01} картина распределения поля:



Тепловые потери отсутствуют из-за того, что силовые линии не касаются стенок волновода. Таким образом, можно обеспечить широкий спектр частот с малым затуханием, причем стенки волновода могут быть из любого металла.

Однако волне H_{01} присущ ряд недостатков:

- 1) Перерождение в другие типы волн при распространении по волноводу. Это приводит к потере аномальных свойств и всех достоинств волны.
- 2) Появление попутного потока наряду с основным, который искажает фазочастотную характеристику. Устранить эти недостатки можно следующим образом:

- ✚ Обеспечение высокой однородности структуры волновода.
- ✚ Покрытие поверхности волновода материалом с большой диэлектрической проницаемостью, которая обеспечивает фильтрацию электромагнитной волны.
- ✚ Применение спиральных стальных волноводов, представляющих собой витую конструкцию. При этом обеспечивается прерывание пути тока в стенках волновода и снижаются тепловые потери за счет фильтрации перерожденных волн.

Такая конструкция перспективна, так как не требует дефицитных цветных металлов, технологична, гибкая, и удобная для прокладки.

Однако из-за широкого внедрения волоконных световодов металлические волноводы в настоящее время для дальней связи не применяются.

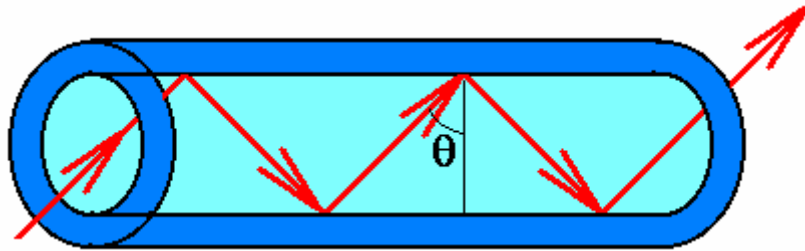
Лекция №23

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 SiO_2 с высокой степенью очистки (10^{-9} примесей).

В простейшем случае волоконные световоды могут быть полимерными.



Показатель преломления:

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

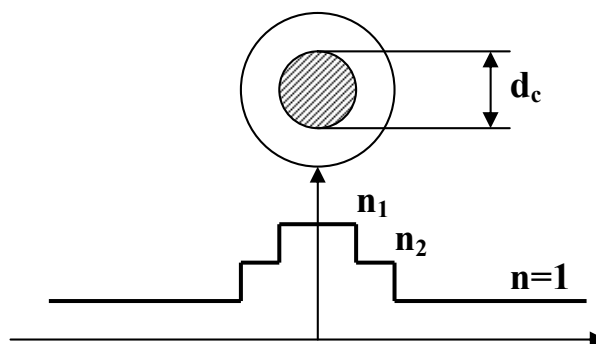
Сердцевина должна быть оптически более плотной, чем оболочка.

Волокна делятся на:

- ✚ ступенчатые $n_1 = \text{const}$ и $n_2 = \text{const}$.
- ✚ градиентные $n_1 = f(r)$.

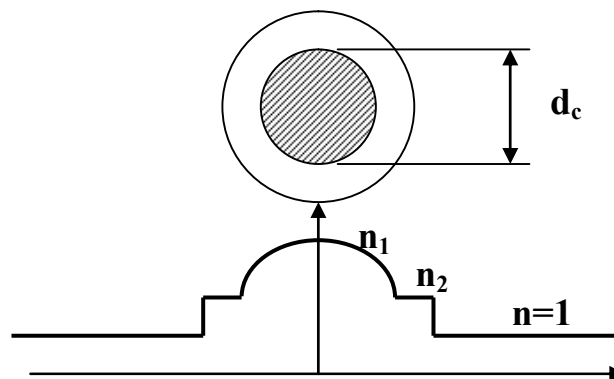
В зависимости от диаметра сердцевины волокна подразделяются на многомодовые ($50 \div 62,5 \mu\text{м}$), и одномодовые ($8 \div 10 \mu\text{м}$).

Ступенчатый показатель преломления:



По оболочке и много- и одномодовые волокна имеют одинаковый диаметр $125 \mu\text{м}$.

Градиентные волокна, как правило, многомодовые.



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

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:

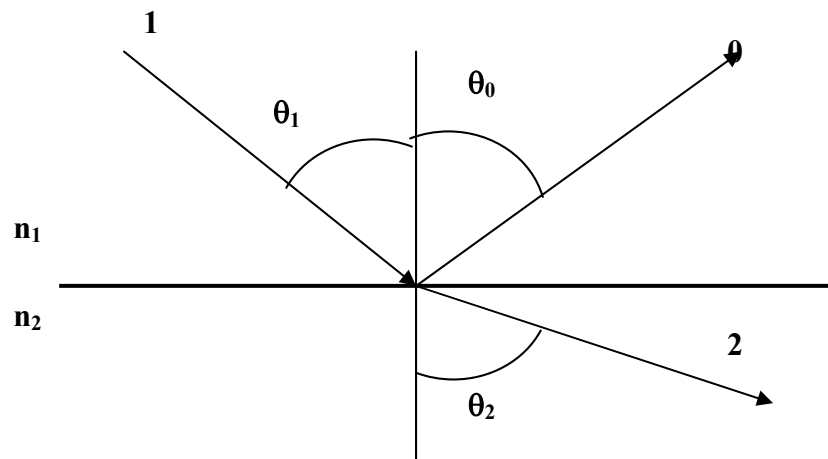
- ✚ Волновую, которая характеризует луч света как электромагнитную волну очень высокой частоты $10^{13} - 10^{15}$ Гц.
- ✚ Квантовую, т.е. представляет собой дискретные пучки квантов или корпускул излучаемых источником и распространяющихся по законам геометрической оптики.

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 $x \ll d_c$ можно воспользоваться простой квантовой теорией на основе законов геометрической оптики.

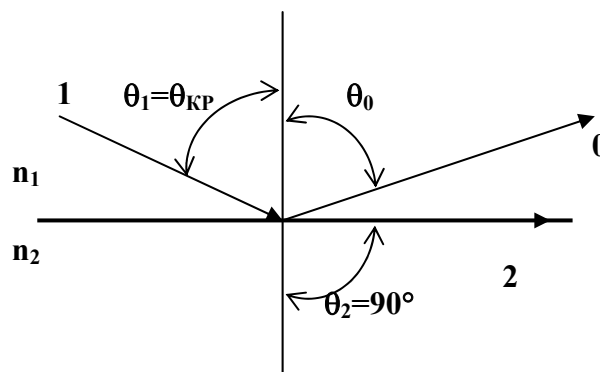
Рассмотрим процессы в световоде согласно данной теории.



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

$$\theta_1 = \theta_0$$

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



$$\theta_1 > \theta_{KP} \Rightarrow \sin \theta_1 \geq \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} - \text{полное внутреннее отражение}$$

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 $n_1 > n_2$.

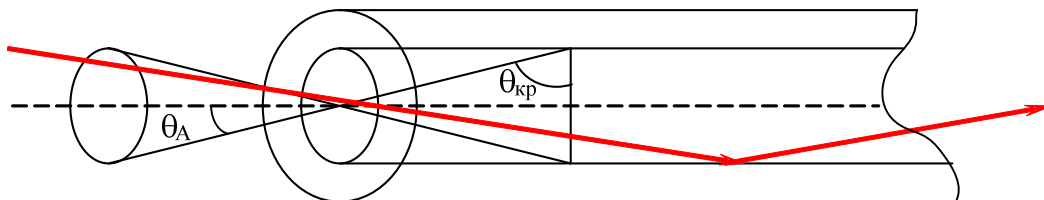
Защита волокна.

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, станционные – полимерное ВЗУП. Диаметр волокна с защитным покрытием составляет величину 240÷700мкм.

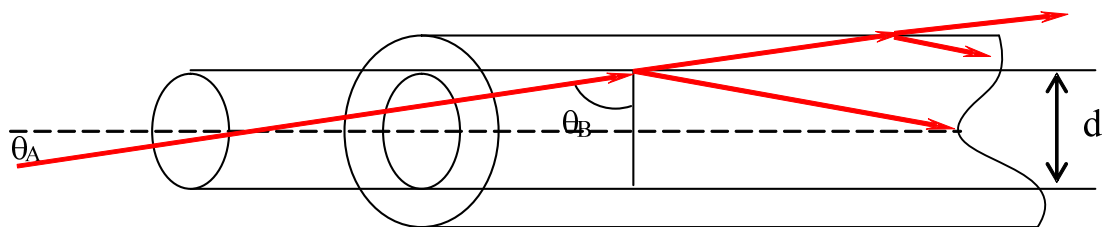
Апертура

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 .

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

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

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

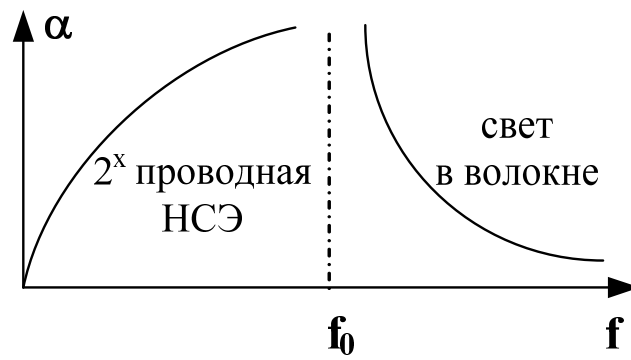
$$\boxed{\sin \theta_A = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad \text{— числовая апертура}$$

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

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.

Лекция №24

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.

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

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 $v = P_{nm}$ при условии, что весь световой поток распространяется в сердцевине

$$v = P_{nm} = g_2 r$$

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

$N = v^2$ – ступенчатое волокно.

$$N = \frac{v^2}{2} \quad \text{– градиентное волокно.}$$

Затухание в ОВ

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 $\text{tg}\delta \approx 10^{-10}$

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

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.

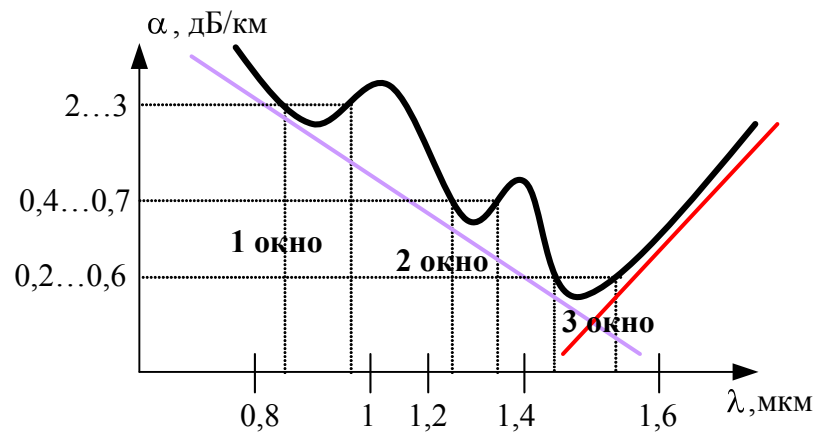
Затухание рассеяния $\alpha_p = \frac{k_p}{\lambda^4}$ связано с рассеянием световой энергии на

различных локальных изменениях показателя преломления сердцевины, 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.

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda} \quad \text{дБ / км}$$

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

Релеевский коэффициент k_p характеризует степень неоднородностей ОВ.

Дисперсия ВС

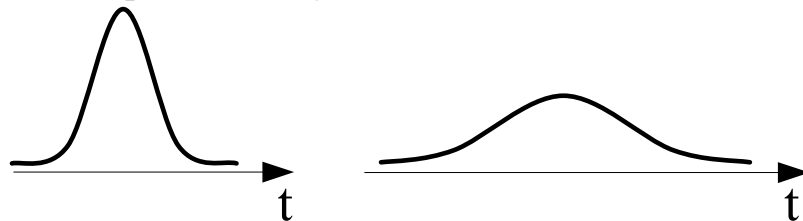
Дисперсией ВС называется рассеяние во времени модовых или спектральных составляющих оптического сигнала. **Уширение** импульсов есть следствие действия дисперсии.

Межмодовая (модовая) дисперсия.

$$\tau_{MM} \rightarrow N = \left(\frac{\pi d c}{\lambda} \right)^2 \Delta_{\Delta} - \text{относительный показатель преломления.}$$

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

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.

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

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

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

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

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

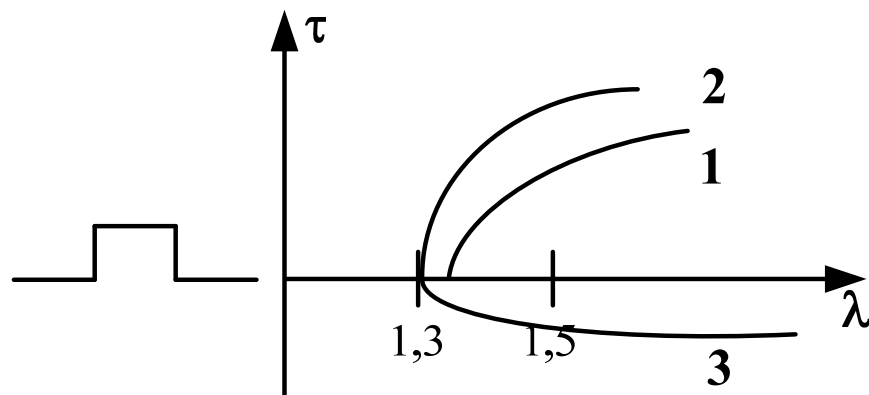
В общем случае дисперсия ОВ определяется как среднеквадратическое значение

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

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.

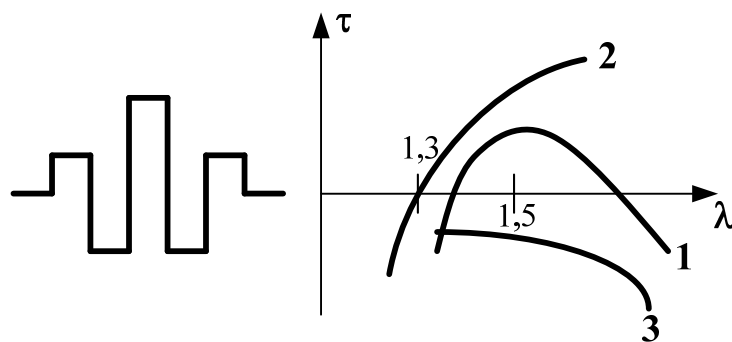
Для снижения хроматической дисперсии в одномодовых волокнах используют то, что материальная дисперсия может менять свой знак. Точка в которой она равна нулю называется точкой нулевой материальной дисперсии. Она соответствует длине волны 1,28 мкм для кварца.



Точка нулевой дисперсии для ступенчатого одномодового волокна смещается на $\lambda=1,3\mu\text{м}$. 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.



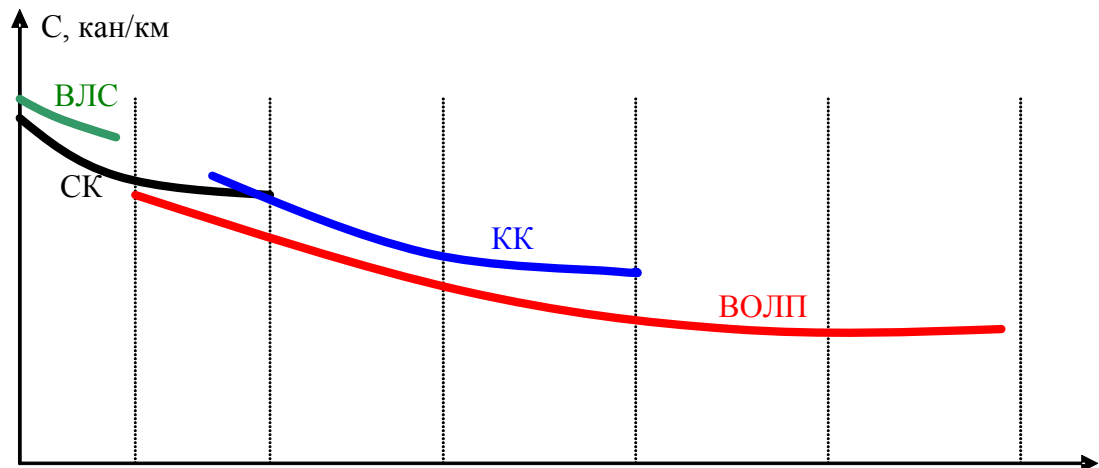
Затухание и дисперсия являются двумя основными параметрами, определяющими длину регенерационного участка систем передачи.

Сравнение НСЭ

Сравнение НСЭ по качеству:

Тип НСЭ	Параметры затухания			Внешнее поле	Частотный диапазон	Количество каналов
	затухание в металле	затухание в диэлектрике	затухание излучения			
СК	+	+	—	+	до 10 ⁶	до 1000
ВЛС	+	+	+	+	до 10 ⁵	до 15
КК	+	+	—	—	до 10 ⁹	до 10 ⁴
Металл.	+	+	—	—	10 ¹⁰ ÷10 ¹²	до 10 ⁵
волновод						
ВОЛП	—	+	—	—	10 ¹² ÷10 ¹⁵	до 10 ⁶

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



Лекция №25

Взаимные влияния в НСЭ.

Пункт 6.1

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.

Пункт 6.2

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.

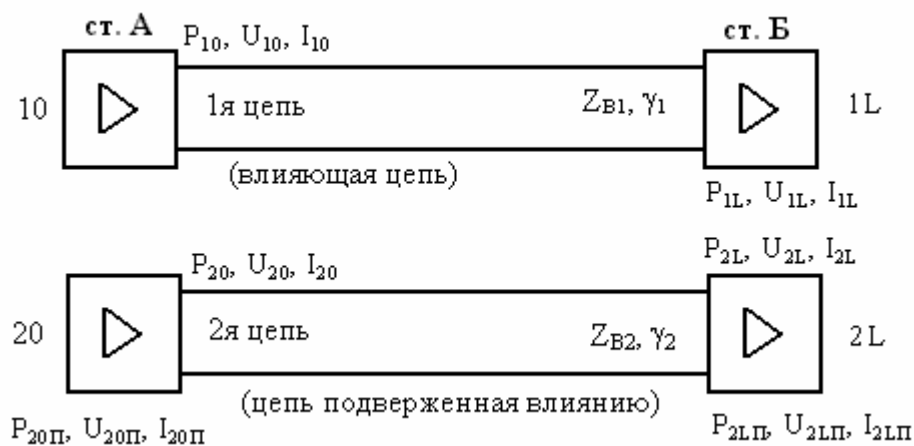
P_{20} – мощность сигнала в начале 2-й цепи.

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

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

$P_{2LП}$ – помеха в конце второй цепи.

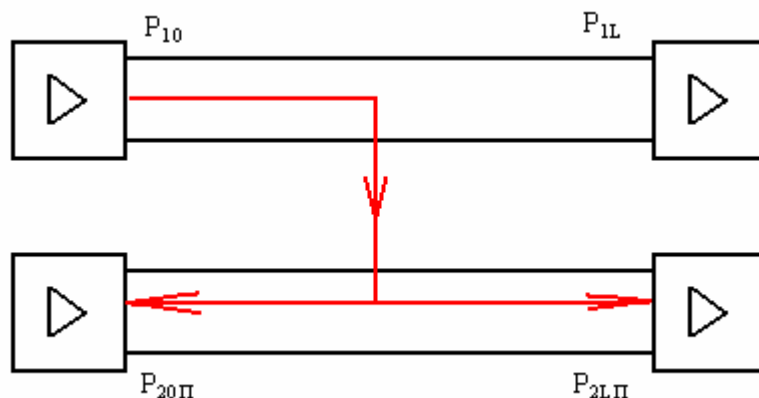
Рассмотрим действие соответствующих токов, напряжений и мощностей на ст. А и ст. Б для взаимно влияющих цепей.



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

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

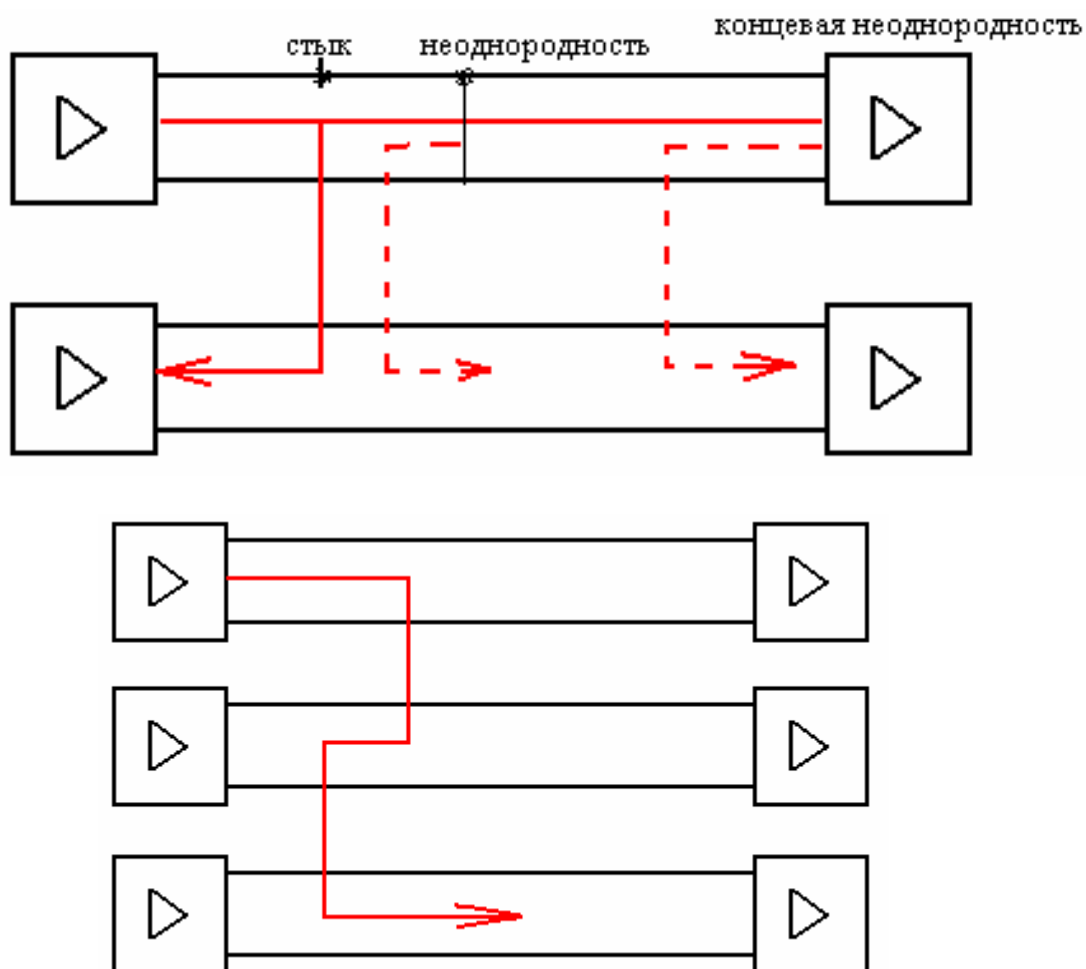
Различают *непосредственные или прямые влияния* – это помехи, индуцируемые непосредственно электромагнитным полем влияющей цепи.



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:

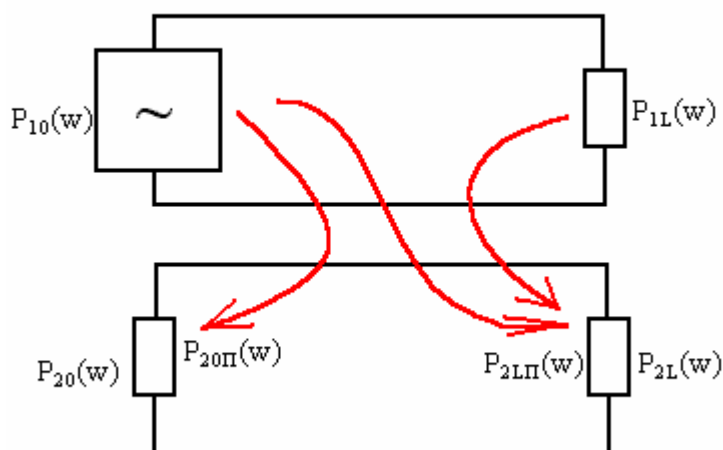
- ✚ *Переходное затухание на частоте ω на ближнем конце линии $A_0(\omega)$.*
- ✚ *Переходное затухание на частоте ω на дальнем конце линии $A_L(\omega)$.*
- ✚ *Защищенность на частоте ω на дальнем конце линии $A_3(\omega)$.*

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

$$A_l(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{2л\Pi}(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{2л\Pi}(\omega)} \right|$$

$$A_3(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{2л}(\omega)}{P_{2л\Pi}(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_{2л}(\omega)}{P_{2л\Pi}(\omega)} \right|$$

Графически переход помех можно представить в виде рисунка:



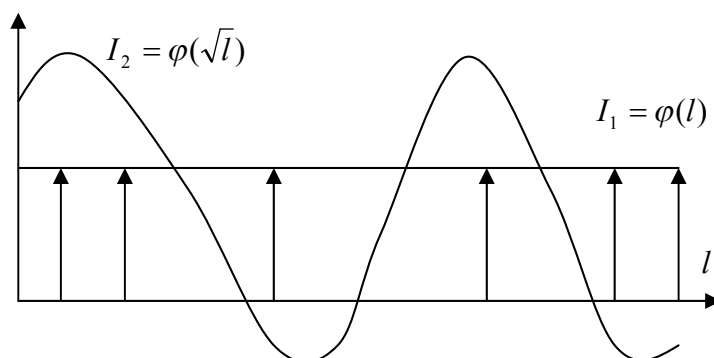
$$A_3(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_C(\omega)}{P_{\Pi}(\omega)} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{P_C(\omega)}{P_{\Pi}(\omega)} \right|$$

$$A_3(\omega) = P_C(\omega) - P_n(\omega)$$

$$A_e(\omega) = A_3(\omega) + \alpha(\omega)e$$

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 строительно-монтажных работ выполняется скрещивание цепей, используются контура противосвязи. Все эти мероприятия в процессе строительно-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 №26

Пункт 6.3

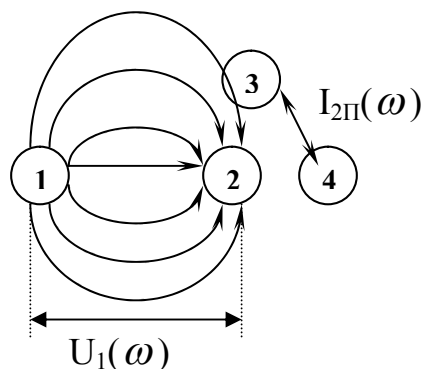
Взаимные влияния в симметричных цепях связи

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.

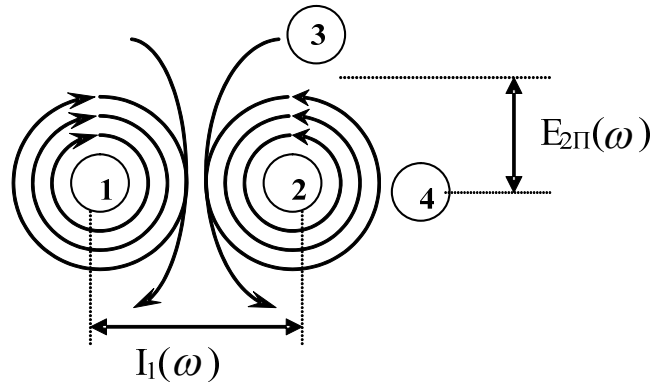
$$k_{12}(j\omega, l) = \frac{I_{2П}(\omega)}{U_1(\omega)} = g_{12} + j\omega k_1 \quad (см)$$

g_{12} – активная составляющая электрической связи, обусловлена асимметрией 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 $k_{12}(j\omega) = \frac{k_{12}(j\omega, l)}{l}, \quad См/км$

Рассмотрим действие магнитного поля



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

$$M_{12}(j\omega, l) = \frac{E_{2П}(\omega)}{I_1(\omega)} = r_{12} + j\omega m_1 \quad (см)$$

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*:

$$M_{12}(j\omega) = \frac{M_{12}(j\omega, l)}{l} \quad (Ом / км)$$

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 $k'_{12}(\omega)$

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

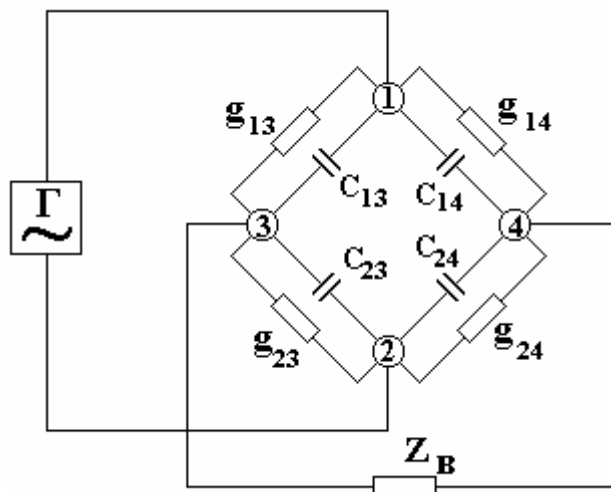
$$M'_{12}(\omega) = \frac{rL_{12} + j\omega m_1}{Z_{B1} Z_{B2}} \quad См$$

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.



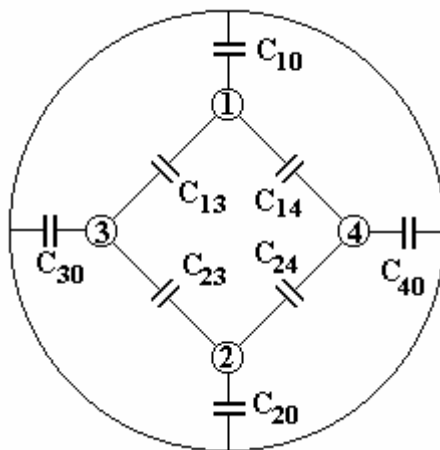
Условием баланса моста является равенство нулю суммы частичных проводимостей изоляции и емкостей противоположных плеч моста.

$$\begin{aligned} (C_{13} + C_{24}) - (C_{23} + C_{14}) &= 0 \\ (g_{13} + g_{24}) - (g_{23} + g_{14}) &= 0 \\ k_1 &= (C_{13} + C_{24}) - (C_{23} + C_{14}) \\ g_{12} &= (g_{13} + g_{24}) - (g_{23} + g_{14}) \end{aligned}$$

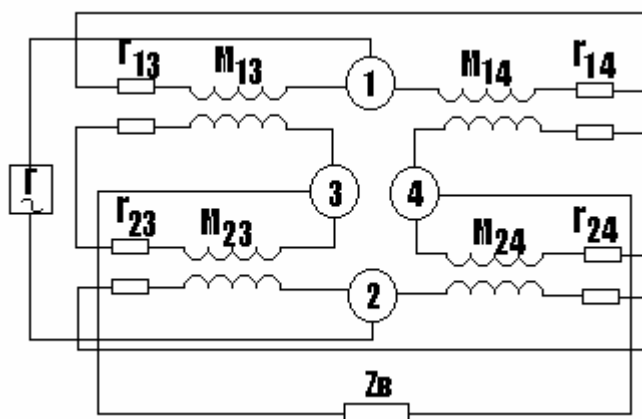
Чем больше разбаланс емкостей, тем больше k_1 . Чем больше разбаланс асимметрии активной составляющей, тем больше g .

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.

$$\begin{aligned} \text{I/II} \quad k_1 &= (C_{13} + C_{24}) - (C_{23} + C_{14}) \\ \text{I/иск} \quad k_2 &= (C_{13} + C_{14}) - (C_{23} + C_{24}) \\ \text{II/иск} \quad k_3 &= (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24}) \\ C_{10} &= C_{20} = C_{30} = C_{40} - \text{баланс моста.} \end{aligned}$$



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

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

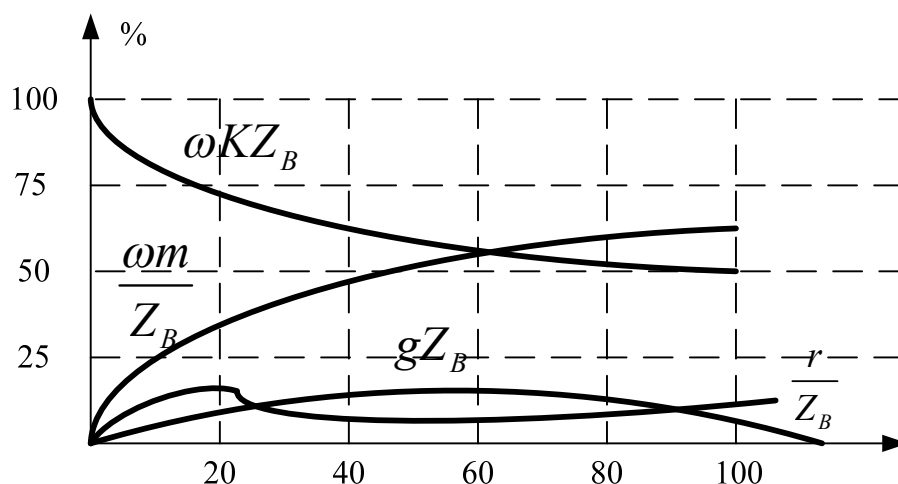
$M_{12}(i \omega) = r_{12} + i \omega m_1$ – коэффициент магнитной связи.

$K_{12}(i \omega) = g_{12} + i \omega k_1$ – 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: $g_{12}=(0.1...0.15)\omega K_1$
 $r_{12}=(0.2...0.4)\omega m_1$ 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 использовании 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 $l_{сд} < \pi/4$ 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** $A_0(\omega)$, $A_1(\omega)$, $A_3(\omega)$.

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 ($\gamma = \alpha + i\beta$).

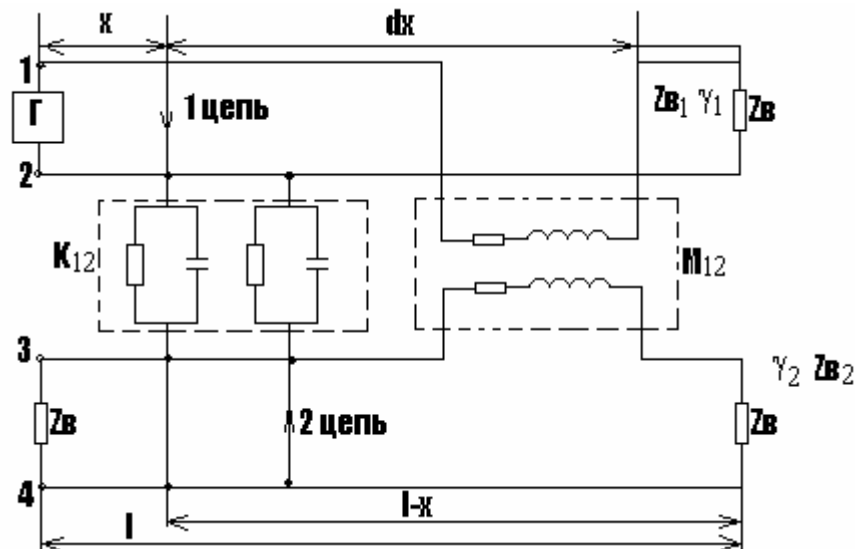
$$I_{\Pi} = \sqrt{|I_{1c.d.n}^2| + |I_{2c.d.n}^2| + |I_{3c.d.n}^2| + \dots}$$

Лекция №27

Пункт 6.4

Основное уравнение взаимного влияния между симметричными цепями.

Рассмотрим эквивалентную схему взаимных влияний в симметричных цепях:



Выводы:

1. на ближнем конце второй цепи токи помех от электрической и магнитной связи суммируются, так как направлены в одну сторону.
2. На дальнем конце второй цепи токи помех от электрической и магнитной связи вычитаются, так как направлены встречно.
3. На дальнем конце второй цепи токи помех взаимно компенсируются в любой симметричной цепи.

Определимся со значением тока в 1й цепи в точке x.

$$I_{1x}(j\omega) = I_{10}(j\omega)e^{-\gamma x} = \frac{U_{10}(j\omega)}{Z_{B1}}e^{-\gamma x}$$

$$V_{10}(j\omega) = U_{10}(j\omega)e^{-\gamma x}$$

Определим действие ЭДС помех во второй цепи от магнитной связи на участке dx

$$dE_{2xn}(j\omega) = -I_{1x}(j\omega)M_{12}(j\omega)dx$$

$$dI_{2xn\text{ м}}(j\omega) = dE_{2xn}(j\omega)/2Z_{B2} \quad \text{— ток от этой ЭДС во 2й цепи.}$$

$$dI_{2xn\text{ э}}(j\omega) = I_{1x}(j\omega)Z_{B1}k_{12}(j\omega)dx \quad \text{— ток помех во 2й цепи.}$$

Величина тока от элементарного участка dx протекающего к ближнему концу второй цепи от электрического влияния определяется соотношением:

$$dI_{2xn \text{ эб}}(j\omega) = -\frac{1}{2} I_{1x}(j\omega) Z_{B1} k_{12}(j\omega) dx$$

$$dI_{2xn \text{ эд}}(j\omega) = \frac{1}{2} I_{12}(j\omega) Z_{B1} k_{12}(j\omega) dx$$

Рассмотрим совместно действие электрического и магнитного влияния на ближнем и дальнем конце второй цепи от элемента dx , на котором действуют э/м связи.

$$\begin{aligned} dI_{20nx}(j\omega) &= \left[dI_{2xn \text{ эб}}(j\omega) + dI_{2xn \text{ м}}(j\omega) \right] e^{-\gamma x} = \\ &= -\frac{1}{2} I_{10}(j\omega) \left[k_{12}(j\omega) Z_{B1} + \frac{M_{12}(j\omega)}{Z_{B2}} \right] e^{-(\gamma + \gamma_*)x} \\ dI_{2lnx}(j\omega) &= \left[dI_{2xn \text{ эд}}(j\omega) + dI_{2xn \text{ м}}(j\omega) \right] e^{-\gamma(l-x)} = \\ &= \frac{1}{2} I_{10}(j\omega) \left[k_{12}(j\omega) Z_{B1} - \frac{M_{12}(j\omega)}{Z_{B2}} \right] e^{-(\gamma - \gamma_*)x} e^{-\gamma l} \end{aligned}$$

Для нахождения полной величины тока помех действующего в начале и в конце второй цепи от электрического и магнитного влияния, проинтегрируем выражения в формулах, зависящих от x , по всей длине линии l . Получим суммарный ток помех на ближнем конце второй цепи:

$$\begin{aligned} I_{20n}(j\omega) &= -\frac{1}{2} I_{10}(j\omega) \left[k_{12}(j\omega) Z_{B1} + \frac{M_{12}(j\omega)}{Z_{B2}} \right] \int_0^l e^{-(\gamma + \gamma_*)x} dx \\ I_{2ln}(j\omega) &= \frac{1}{2} I_{10}(j\omega) \left[k_{12}(j\omega) Z_{B1} - \frac{M_{12}(j\omega)}{Z_{B2}} \right] e^{-\gamma l} \int_0^l e^{-(\gamma - \gamma_*)x} dx \\ \int_0^l e^{-ax} dx &= \frac{1}{a} (1 - e^{-al}) \end{aligned}$$

Используя данное решение, аналогично получим значение тока помех на ближнем конце:

$$I_{20n}(j\omega) = -\frac{1}{2}I_{10}(j\omega) \left[k_{12}(j\omega)Z_{B1} + \frac{M_{12}(j\omega)}{Z_{B2}} \right] \frac{1 - e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)l}}{2(\gamma_1 + \gamma_2)}$$

$$I_{2ln}(j\omega) = \frac{1}{2}I_{10}(j\omega) \left[k_{12}(j\omega)Z_{B1} - \frac{M_{12}(j\omega)}{Z_{B2}} \right] e^{-\gamma l} \frac{1 - e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)l}}{2(\gamma_1 - \gamma_2)}$$

Воспользуемся далее определением вторичных параметров взаимного влияния

$$A_0(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{20\Pi}(\omega)} \right| = 20 \lg \left| \frac{I_{10}(\omega)\sqrt{Z_{B1}}}{I_{20\Pi}(\omega)\sqrt{Z_{B2}}} \right|$$

$$A_l(\omega) = 10 \lg \left| \frac{P_{10}(\omega)}{P_{2l\Pi}(\omega)} \right| = 20 \lg \left| \frac{I_{10}(\omega)\sqrt{Z_{B1}}}{I_{2l\Pi}(\omega)\sqrt{Z_{B2}}} \right|$$

Значение токов помех мы нашли. Обозначим через $N_{12}(\omega)$ – коэффициент электромагнитной связи на ближнем конце линии.

$$N_{12}(\omega) = k_{12}(\omega)Z_{B1} + \frac{M_{12}(\omega)}{Z_{B2}}$$

$$F_{12}(\omega) = k_{12}(\omega)Z_{B1} - \frac{M_{12}(\omega)}{Z_{B2}} \quad \text{– на дальнем конце.}$$

С учетом данной записи получаем:

$$A_0(\omega) = 20 \lg \left| \frac{2}{N_{12}(\omega)} \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{1 - e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)l}} \right| \quad \text{дБ}$$

$$A_l(\omega) = 20 \lg \left| \frac{2e^{\gamma_2 l}}{F_{12}(\omega)} \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{1 - e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)l}} \right| \quad \text{дБ}$$

В большинстве кабельных цепей выполняется условие однородности, т.е. все соседние цепи одинаковы. Поэтому можно принять следующее допущение:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \quad Z_{B1} = Z_{B2} = Z_B$$

Для данных условий формулы упрощаются

$$A_0(w) = 20 \lg \left| \frac{4\gamma}{N_{12}(w)} \frac{1}{1 - e^{-2\gamma l}} \right| \quad \partial B$$

$$A_l(w) = 20 \lg \left| \frac{2e^{\gamma l}}{F_{12}(w)l} \right| = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}(w)l} \right| + \alpha(w)l \quad \partial B$$

Мы учли что $|\gamma| = \alpha$

$$A_l(w) = A_3(w) + \alpha(w)l$$

$$A_3(w) = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}(w)} \right| \quad \partial B$$

В большинстве кабельных цепей при соединении строительных длин в единую линию известны фазовые соотношения токов помех. Поэтому, как было указано раньше, рассматривается среднеквадратическое значение токов помех без учета фазы. Для таких цепей вместо коэффициента распространения γ рассматривают только коэффициент затухания α .

При этом вторичные параметры имеют вид:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \quad Z_{B1} = Z_{B2} = Z_B$$

$$A_0(w) = 20 \lg \left| \frac{4\sqrt{\alpha}}{N_{12}(w)\sqrt{1 - e^{-4\alpha l}}} \right| \quad \partial B$$

$$A_l(w) = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}(w)\sqrt{e}} \right| + \alpha(w)l \quad \partial B$$

$$A_3(w) = A_l(w) - \alpha(w)l = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}(w)\sqrt{e}} \right| \quad \partial B$$

В ряде случаев возникает необходимость исследовать не только АЧХ изменения взаимных влияний, которое определяется параметрами $A_0(w)$, $A_l(w)$, $A_3(w)$, но и ФЧХ переходных затуханий. Для этого вводится еще один дополнительный параметр называемый передаточной функцией взаимных помех (ПФВП).

ПФВП подразделяется на

ближнем конце линии $A_0(jw)$

дальнем конце линии $A_l(jw)$

$$A_0(j\omega) = A_0(\omega)e^{j[\varphi_{10}(\omega) - u_{20П}(\omega)]}$$

$$A_l(j\omega) = A_l(\omega)e^{j[\varphi_{10}(\omega) - u_{2лП}(\omega)]}$$

φ -аргумент комплексных амплитуд, действующих сигналов и помех первой и второй цепи. Графически ПФВП представляется в комплексной плоскости, при этом графики ПФВП на комплексной плоскости называются годографами. Данные годографы можно получать на экране ЭЛТ специального прибора измерителя комплексных связей ИКС-600.

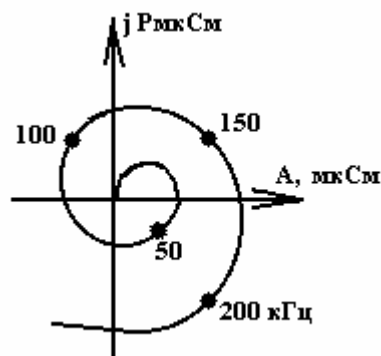
В результате рассмотрения соответствий для переходных затуханий на ближнем и дальнем концах, можно сделать следующие выводы:

Переходное затухание на ближнем конце линии при перемене местами влияющей и подверженной влиянию линий не изменяются. Это непосредственно следует из выражения $A_0(\omega)$, в котором присутствует сумма $\gamma_1 + \gamma_2$. При перемене местами будет $\gamma_2 + \gamma_1$, что не меняет соотношения.

Переходное влияние на дальнем конце линии оказывается различным при влиянии $I/II \neq II/I$. Для выражения $A_l(\omega)$, так как $-\gamma_2 - \gamma_1 \neq \gamma_2 - \gamma_1$. Эффект различия ПФВП на дальнем конце линии при замене I на II называется эффектом перестановки.

Он отрицательно сказывается на повышении защищенности цепей при проведении комплекса мероприятий с симметрированием. Так как проводя симметрирование при влиянии I на II данный эффект теряется при замене местами цепей, что ухудшает условия повышения помехозащищенности. Графически ПФВП на ближнем конце представляет собой спираль, раскручивающуюся с увеличением частоты.

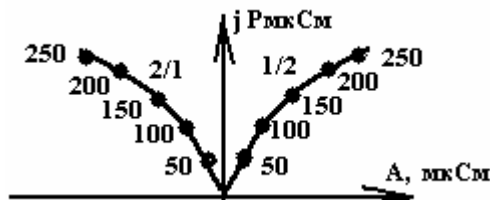
$$A_0(j\omega) = A + jP$$



Чем меньше взаимные влияния тем меньше раскручивается спираль годографа при изменении частоты. При отсутствии взаимных влияний годограф вырождается в точку в центре комплексной плоскости.

Наряду с непосредственными влияниями в цепях существуют косвенные влияния за счет третьих цепей, стыковых и кольцевых неоднородностей. При этом необходимо рассматривать результирующую защищенность от непосредственных и косвенных влияний.

Наряду с непосредственными влияниями в цепях существуют косвенные влияния за счет третьих цепей, стыковых и кольцевых неоднородностей. При этом необходимо рассматривать результирующую защищенность от непосредственных и косвенных влияний.



$$A_{з\text{рез}}(w) = -10\lg(10^{-0,1A_3(w)} + 10^{-0,1A_{з\text{прц}}(w)} + \\ + 10^{-0,1A_{з\text{к1н}}(w)} + 10^{-0,1A_{стн}}(w) + \dots)$$

В общем случае будет как минимум 4 составляющих.

Результирующее значение защищенности может существенно отличаться от защищенности при непосредственных влияниях, то есть косвенные влияния могут значительно ухудшить параметры помехозащищенности, и их необходимо учитывать при оценке помехозащищенности цепи.

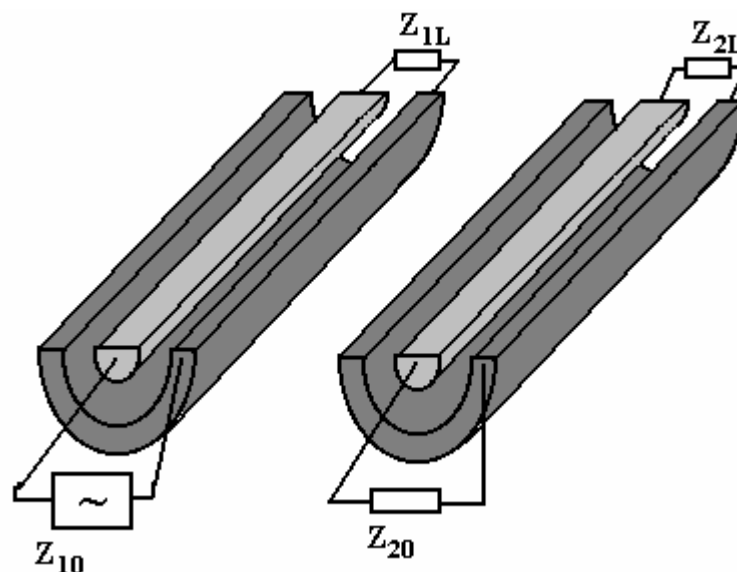
Лекция №28

Пункт 6.5

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.

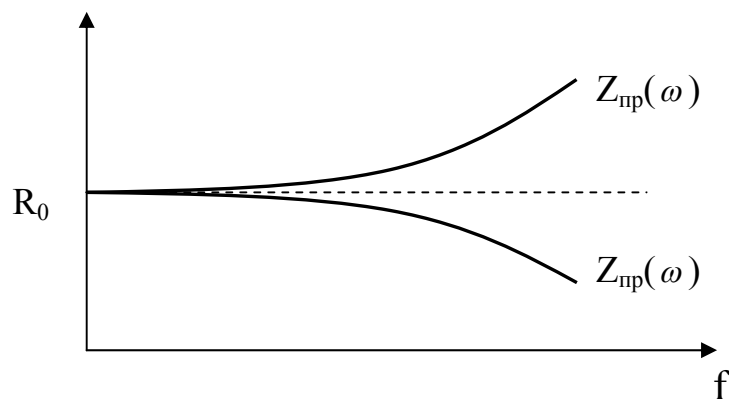
Чем больше действующее напряжение на поверхности внешнего проводника влияющей цепи, тем больше будет ИП. За счет эффекта самоэкранирования, с ростом частоты уменьшается EZ на поверхности внешнего проводника, следовательно, уменьшается взаимное влияние.

В отличие 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.



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

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

t - толщина внешнего проводника.

k - коэффициент вихревых токов.

σ - удельная проводимость внешнего проводника.

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

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

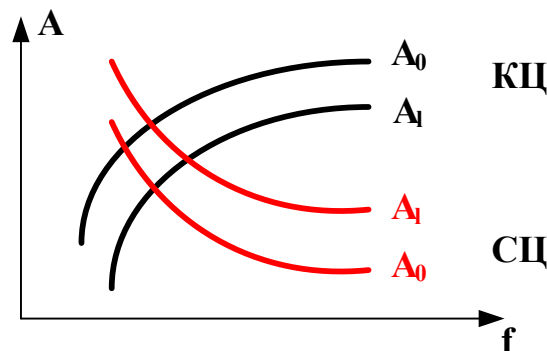
Определяя через магнитную связь для тока помех во 2й цепи можно перейти ко вторичным параметрам влияния.

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

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

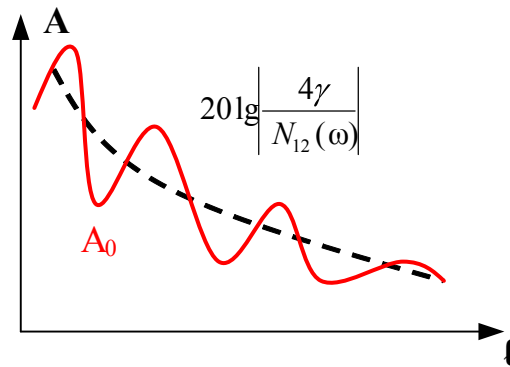
Зависимость вторичных параметров влияния симметричной и коаксиальной цепи от частоты и длины линии.

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



Так как в коаксиальной цепи отсутствует взаимокомпенсации 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 $A_1 > A_0$.

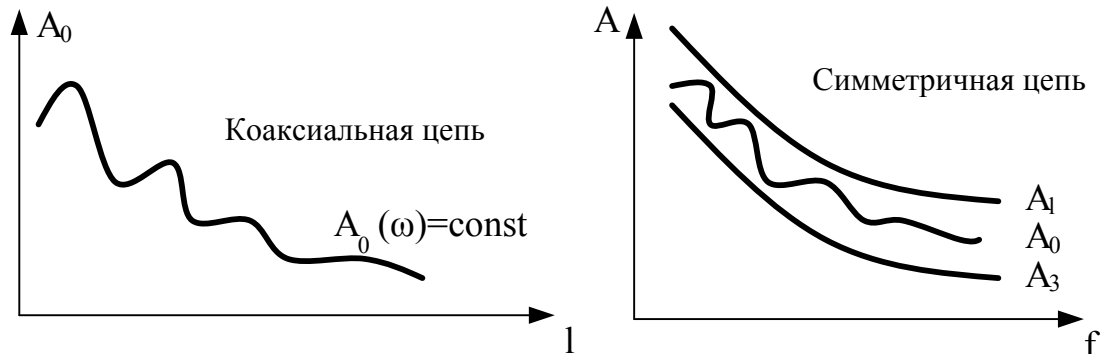


Особенностью частотной зависимости A_0 является колебательно асимптотический характер кривой, особенно на низких частотах.

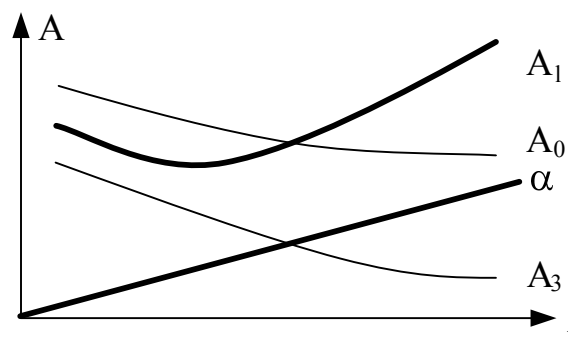
Это обусловлено тем, что помеха приходит на ближний конец 2й цепи с разными фазами в зависимости от частоты и длины волны, что приводит к волнообразному характеру изменения A_0 . Аналогичный характер будет и для длины линии.

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



Лекция №29

Пункт 6.6

Взаимные влияния в ВОК.

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.

Пункт 6.7

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:

$A_{3yy}=73,8$ 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:

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

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

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

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 №30

Пункт 6.8

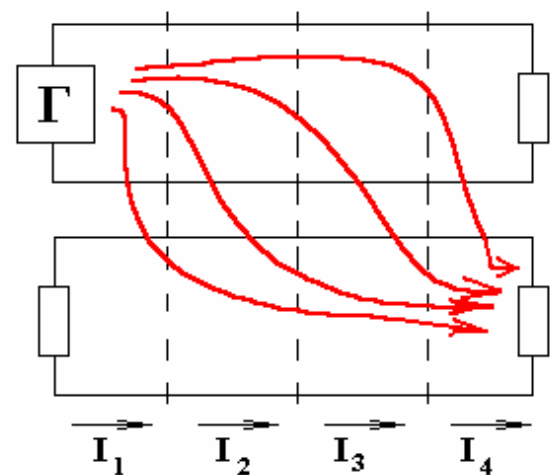
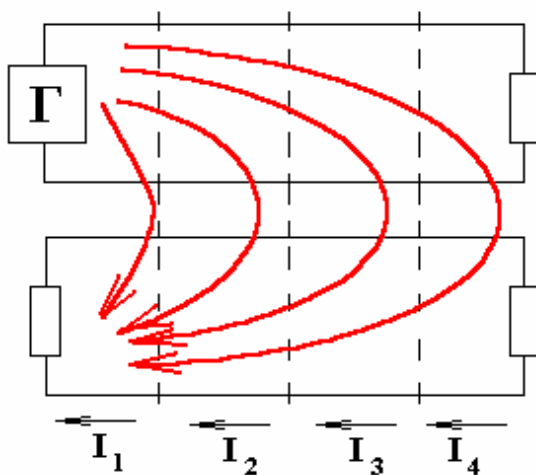
Меры защиты НСЭ от взаимных влияний

Основные меры защиты:

- ✚ Применение КК и ВОЛС, имеющих высокую помехозащищенность по сравнению с другими линиями связи.
- ✚ Взаимная компенсация помех между цепями ЛС за счет скрещивания на ВЛС, а также скрутки и симметрирования в СК.
- ✚ Экранирование цепей кабелей связи.

Скрещивание цепей ВЛС выполняется в процессе строительства и делится на точечное и пролетное. В процессе скрещивания меняются знаки электромагнитных связей соседних участков линий и взаимокомпенсируются, следовательно число секций скрещивания должно быть четным.

Рассмотрим действие электромагнитных связей на ВЛС:

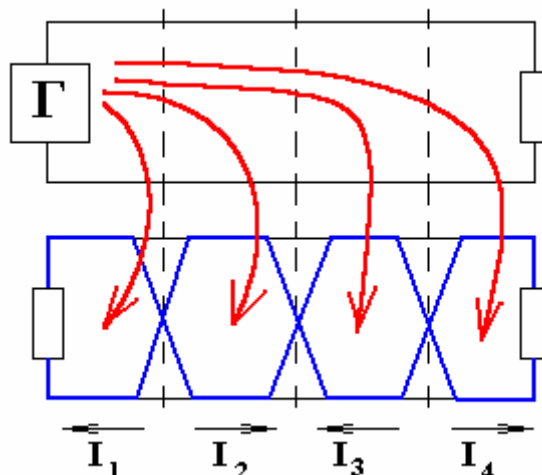


$$I_{20П} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I_1 > I_2 > I_3 > I_4$$

$$I_{2П} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4$$



Аналогично будут компенсироваться токи помех на дальнем конце линии:

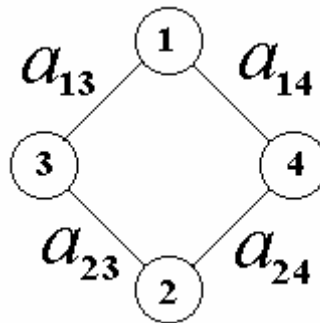
$I_{2II} = I_1 - I_2 + I_3 - I_4$ – компенсация будет полной (из-за равенства токов)

$I_{20II} = I_1 - I_2 + I_3 - I_4$ – не полная компенсация.

Нужно учитывать то, что кроме физического шага скрещивания существует электрический шаг скрещивания, зависящий от длины передаваемой волны, когда фаза сигнала в линии периодически изменяется. Необходимо, чтобы физический и электрический шаги скручивания не совпадали, иначе эффекта компенсации не будет.

Улучшение защищенности СК методом скрутки цепей.

Для уменьшения взаимных влияний отдельные изолированные жилы в структуре сердечника скручиваются в элементарные кабельные группы (парная, звездная скрутка), а также ЭКГ скручиваются в повивы, образуя сердечник кабеля. При скрутке цепей действует тот же эффект, что и при скрещивании. Возникает две основные проблемы. При очень малом шаге скрутки h ЭКГ возрастает расход материала, при больших шагах скрутки получается рыхлая конструкция, которая затрудняет процесс взаимокомпенсации. Оптимальным считается $h=40\dots100\text{мм}$ (парная), и $h=100\dots300\text{мм}$ (звездная). Причем шаги скрутки соседних цепей не должны совпадать. Нужно стремиться к тому, чтобы не разрушать соотношения между расстояниями в ЭКГ для отдельных проводников, т.е. они должны



находиться постоянно в углах квадрата:

$$a_{13} = a_{14} = a_{23} = a_{24}$$

Условием отсутствия электромагнитной связи в ЭКГ является $Q=0$

$$Q = \ln \frac{a_{13}a_{24}}{a_{14}a_{23}} = 0$$

Подбор и согласование шагов скрутки разных цепей производится по участкам называемым секциями симметрии IS:

$$l_s = \frac{h_1 h_2}{D}$$

h_1 - шаг первой ЭКГ.

h_2 - шаг второй ЭКГ.

D – наибольший общий делитель от h_1 и h_2 .

Согласуются также шаги скрутки соседних повивов сердечника кабеля:

$$m \left[\frac{H_1 H_2}{H_1 \pm H_2} \right] = U h_1$$

H_1, H_2 – шаги скрутки соседних повивов сердечника.

m, U – целые положительные числа.

h_1 – шаг скрутки ЭКГ.

Скрещивание цепей СК

При соединении строительных длин кабеля в единую линию при ее строительстве и монтаже может в муфтах дополнительно производиться скрещивание цепей. Для выполнения скрещивания в ЭКГ звездной скрутки имеются 8 операндов скрещивания, каждый из которых имеет 3 индекса:

1й – к 1й цепи

2й – ко 2й цепи

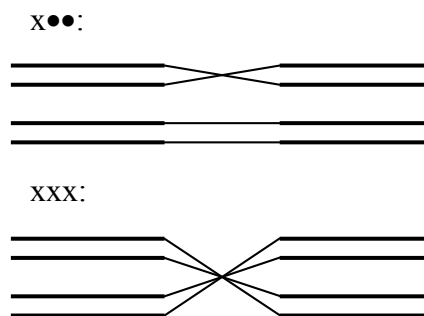
3й – к искусственной (фантомной) четверке.

• - скрещивание не производится

x – скрещивание.

x•• - наибольшая компенсация косвенных влияний от 3х цепей.

Рекомендуется задействовать в каждой муфте линии.



Повышение помехозащищенности СЦ контурами противосвязи

Как известно, на ближнем конце цепи действует электромагнитная связь N_{12} .

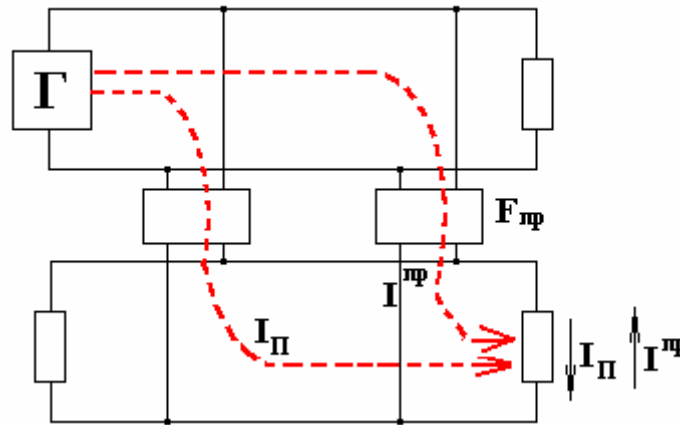
$N_{пр}$ – контур противосвязи.

$$I_{20}^{np} \neq -I_{20П}, \quad N_{12} e^{j\varphi} = N_{np} e^{j\varphi + 180^\circ}$$

Полная компенсация токов помех на ближнем конце произойдет только тогда, если расстояние до точки действия электромагнитной связи будет точно соответствовать расстоянию до точки включения Нпр. Но на практике это осуществить нельзя, так как электромагнитная связь распределена по длине линии, таким образом

$$I_{20}^{np} \neq I_{20\Pi}$$

Рассмотрим для контура противосвязи на дальнем конце 2й цепи:



Путь I_{Π} и I_{Π}^{np} к дальнему концу цепи одинаков, независимо от точки включения контура противосвязи, поэтому можно создать условия, когда

$$I_{2l}^{np} = -I_{2\Pi\Pi}$$

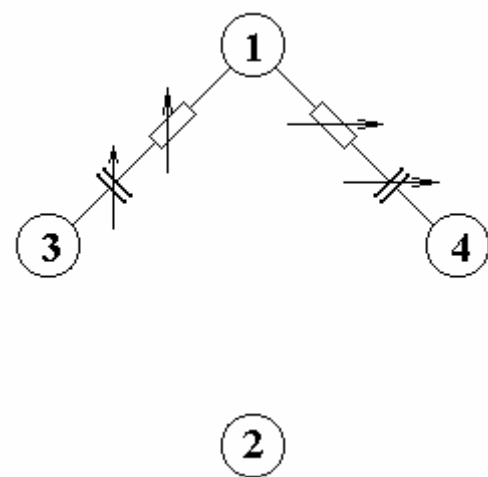
$$F_{np} = Me^{j(\varphi+180)}$$

$F = Me^{j\varphi}$ – есть электромагнитная связь на дальнем конце.

Подбор контура противосвязи:

Между первой и второй цепью подключается прибор ВИЗ-600. Последовательно изменяя R13, R14, C13, C14 добиваемся максимальной помехозащищенности между цепями. Потом измеряют подобранные значения R и C и включают их непостоянно в конце линии.

Для ЦСП, работающих в широком спектре частот Нпр оказывают лишь ухудшающее действие на защищенность, поэтому при реконструкции линии Нпр при переходе на ЦСП демонтируют. Оставляют только скрещивание в муфтах х••.



Лекция №31

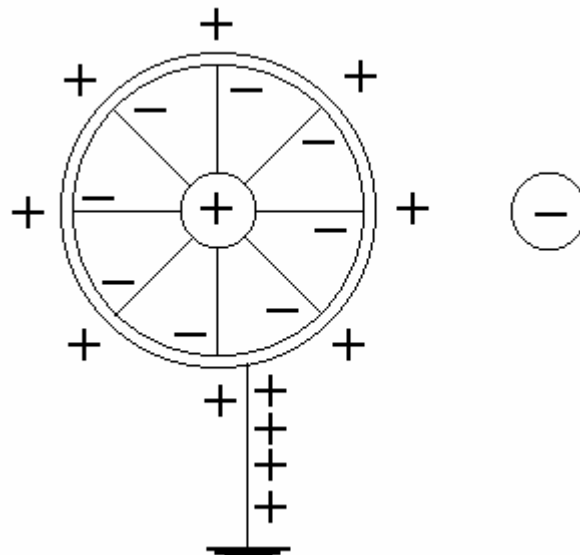
Экранирование КС

Режимы экранирования.

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:

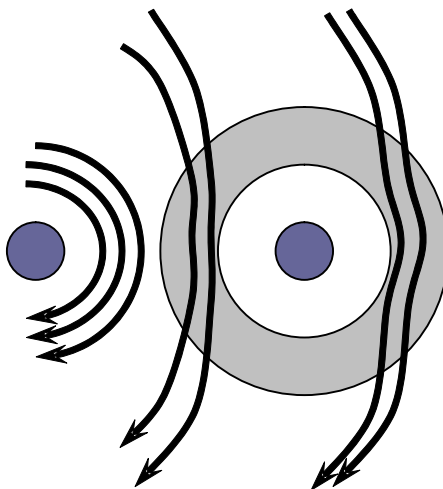
- ✚ Электромагнитостатический, соответствует диапазону частот от 0 до нескольких сотен Гц. В зависимости от действующего поля помех он подразделяется на:
 - ✚ Магнитостатический
 - ✚ Электростатический
- ✚ Электромагнитный, (сотни Гц – сотни МГц), т.е. совпадают с рабочим диапазоном большинства двухпроводных 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.

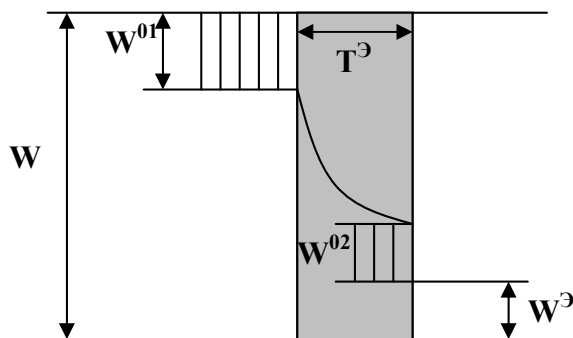


Основано на замыкании магнитного тока помех в толще экрана. Эффективность экранирования в этом случае существенно зависит от толщины экрана и его материала. Лучший эффект дают экраны с большой магнитной проницаемостью (сталь, пермаллой). В данном случае условия заземления не существенны.

Электромагнитное экранирование.

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

Рассмотрим эффект отражения:



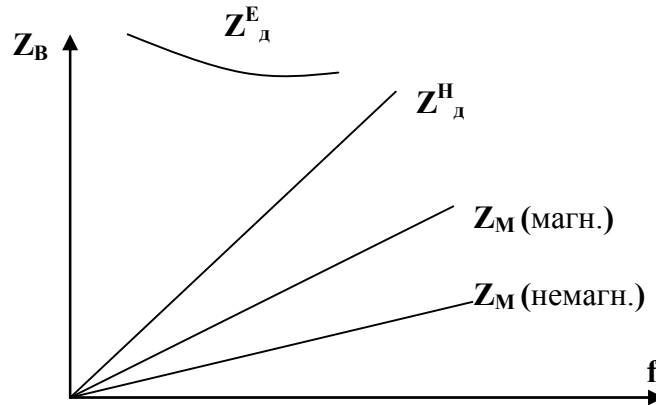
$$\mathcal{E} = \frac{W^{\mathcal{E}}}{W} - \text{эффект экранирования.}$$

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.

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

Чем выше A_{∂} тем выше эффект экранирования.

$$S_{K3Д} = \frac{U^{\text{ж}}}{U} \quad \text{— коэффициент защитного действия.}$$

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 $S_{K3Д}$.

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

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

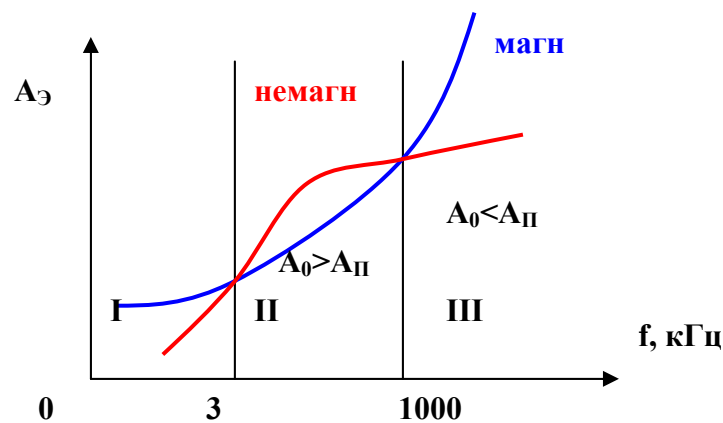
t – толщина экрана

Z_{∂} – волновое сопротивление диэлектрика.

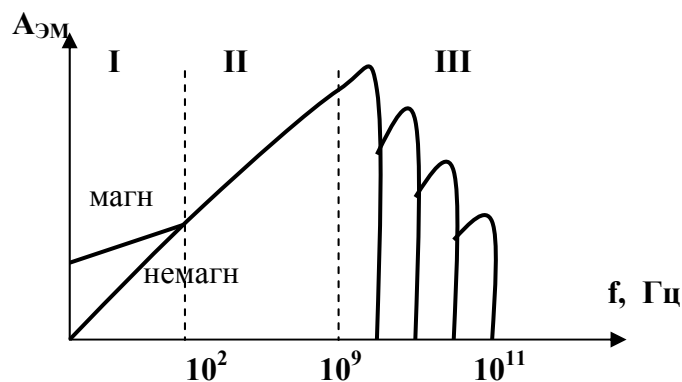
$$A_{\partial} = A_{OT} + A_{\Pi} = 20 \lg \left| 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{\partial}}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_{\partial}} \right) \text{th}(\sqrt{jkt}) \right| + 20 \lg |ch\sqrt{jkt}|$$

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

Рассмотрим изменение параметров экрана для магнитного и немагнитного экранов:

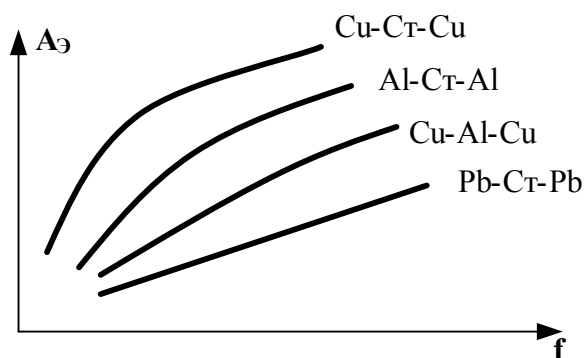


В диапазоне частот симметричных кабелей (до 106Гц) наилучший эффект у немагнитных экранов (медные, алюминиевые). Магнитные экраны лучше, так как выше АП за счет действия вихревых токов. Экраны КК в основном магнитные (стальные). Экранирование магнитного поля менее эффективно экранирования электрического 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.

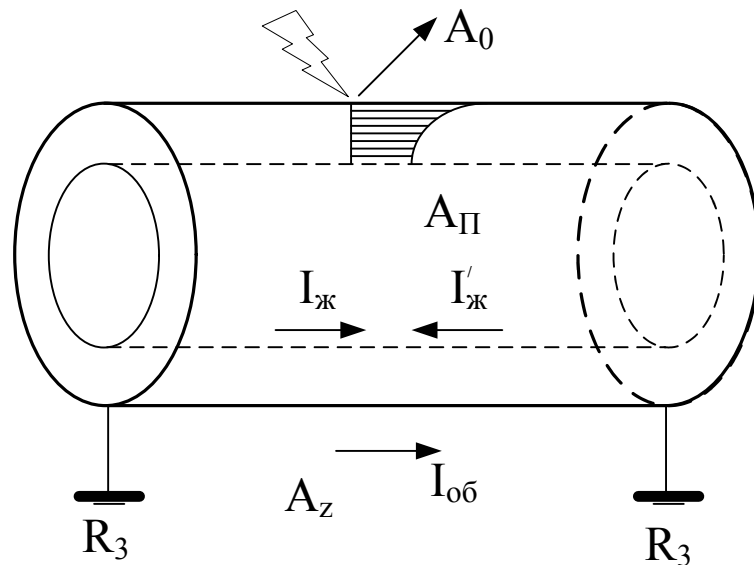
Рассмотрим эффективность многослойных экранов.



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.

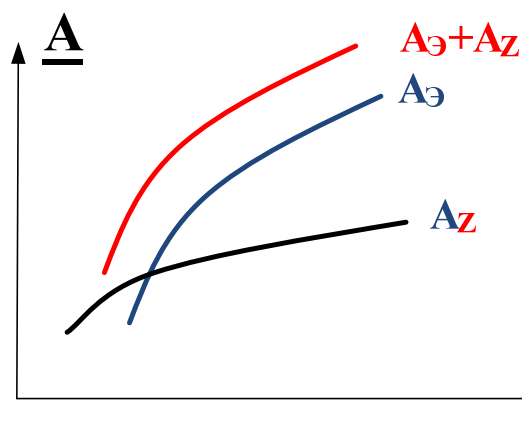
Чем меньше R_3 тем больше $I_{об}$. Под действием $I_{об}$ возникает $E'_{ж}$ и действует

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

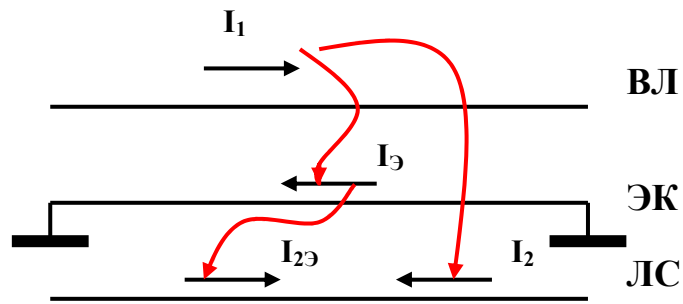
Чем лучше заземлены экран и оболочка, тем при одном и том же индуцированном значении напряжения в оболочке будет больший ток, действующий в оболочке, за счет которого индуцируется напряжение на жиле и действует ток в жиле возрастает эффект экранирования за счет продольных токов.

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

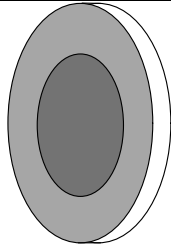
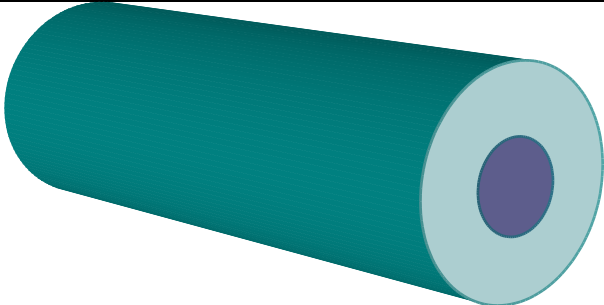
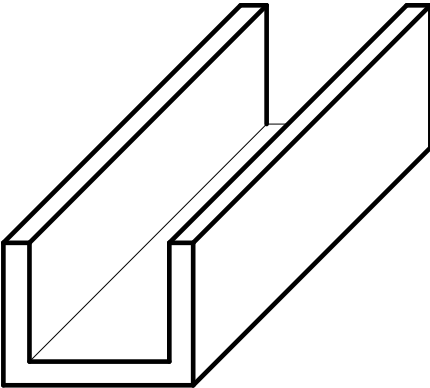
Суммарное действие экранов при экранировании за счет отражения, поглощения, и для продольных токов:



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



Экраны:

	Сферический
	Цилиндрический
	Плоский

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

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

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.

Лекция №32

Внешние влияния на НСЭ

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:

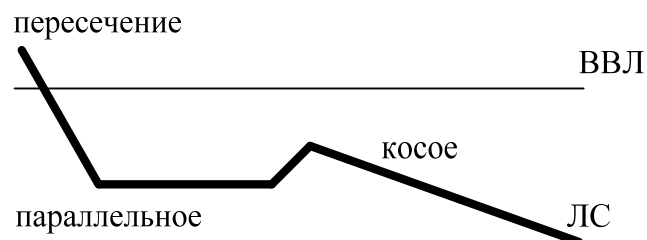
- + опасные
- + мешающие

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.

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

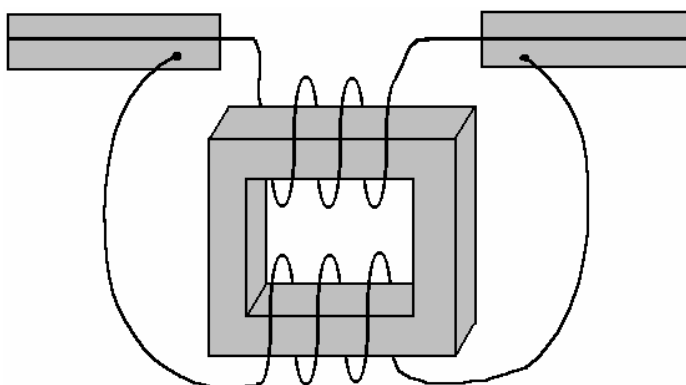
$$E = w \sum_{i=1} I_{pi} l_i S_i m_{12i}$$

$$S = S_{об} S_{тр} S_p S_M$$

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:

$$U=(100\dots1000) \text{ МВ}$$

$$I=10000\dots200000 \text{ А}$$

$$t=5\dots100 \text{ мкс}$$

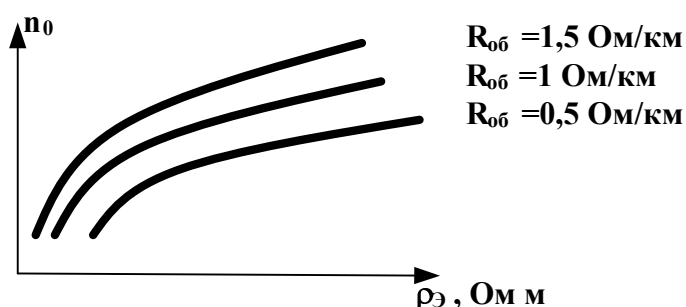
$$n=1\dots30$$

$$T=0,3\dots0,5 \text{ с}$$

$$d_{\text{кан}}=3\dots60 \text{ см}$$

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.



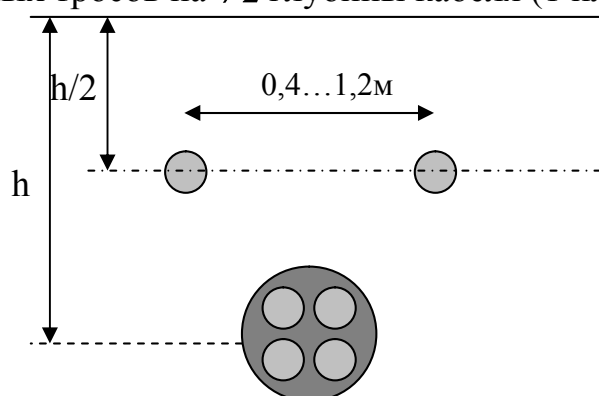
Чем выше удельное сопротивление грунта и сопротивление оболочки, тем меньше вероятное число повреждений.

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

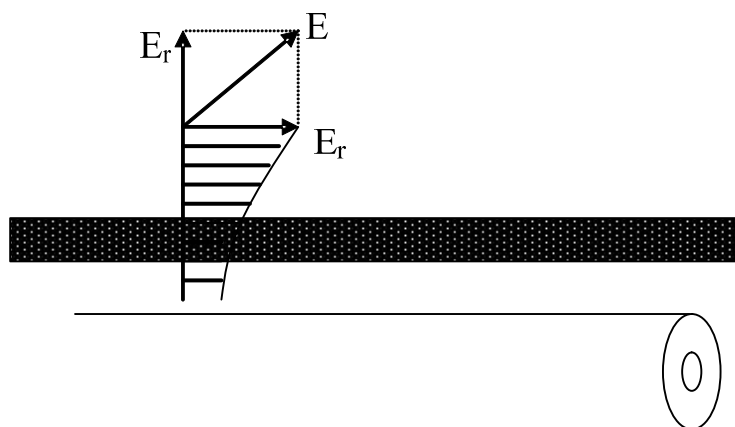
Кабель	$\rho_{\pm} > 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_{\pm} < 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
1x4 КК	0,2	0,3
4x4 7x4	0,1	0,2

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. Психофизическое 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:

$$I_{\text{ЭК}} = K_{\text{П}} F_1 I_1$$

$$U_{ЭК} = K_{П} F_U U_1$$

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

$F_{и1}$ – психофотометрический ток, F_{UU1} – психофотометрическое напряжение.

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

F_i, F_U – форм-факторы.

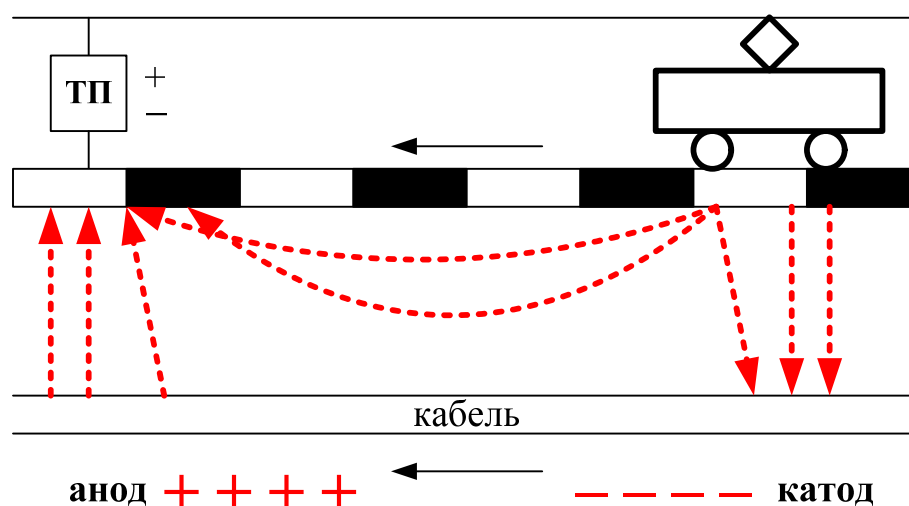
Для каждого источника помех существует свой форм-фактор, позволяющий рассчитать психофотометрическое напряжение и ток по первой гармонике. Нормируется эквивалентное значение напряжение помех, создающее шум в канале связи. Для междугородних линий $U_{ш} < 0,1 \text{ мВ}$, а для местных линий $1,5 \text{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

Коррозия

Виды и классификация коррозий

- ✚ Межкристаллитная
- ✚ Почвенная (электрохимическая)
- ✚ Электрокоррозия (коррозия блуждающими токами).

Источниками межкристаллитной коррозии являются вибрация, ослабляющая межкристаллитные связи в оболочке и приводящая к ее растрескиванию.



Меры защиты:

- ✚ рессорная подвеска кабеля на мостах
- ✚ демпферная или смягчающая прокладка из песка в троншее.
- ✚ Прокладка в трубах под дорогой

При взаимодействии металла оболочки с солями кислот и щелочей, находящихся в грунте образуются гальванические пары, между которыми начинает протекать ток (1А уносит в год 36кг свинца и 20 кг стали).

По интенсивности коррозии различают 3 вида грунта:

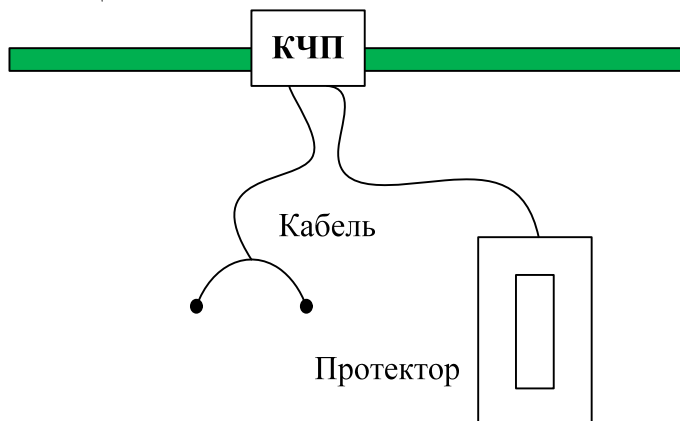
От 0...10 Ом – особо агрессивный

От 10... 100 Ом – среднеагрессивный

Более 100 Ом низкоагрессивный грунт.

Меры защиты:

- + Изоляция оболочки полиэтиленовым шлангом
- + Алюминиевые и свинцовые оболочки должны обязательно покрываться защитным покровом.
- + Протекторная защита.



Меры защиты:

- + изолирующие муфты
- + дренажные установки

СТРОИТЕЛЬСТВО, ПЕРЕУСТРОЙСТВО, РЕКОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕООРУЖЕНИЕ ЛИНЕЙНО-КАБЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ СВЯЗИ

Переустройство или перенос линейно-кабельных сооружений должны производиться по техническим условиям и под контролем эксплуатационных предприятий связи - владельцев сооружений.

Работы по переключению действующих связей на вновь построенные линии производятся только эксплуатационным предприятием владельцем линии связи.

Работы по переустройству и переносу линейно-кабельных сооружений должны, как правило, выполняться без нарушения действующих связей.

Переключение действующих связей на вновь проложенный кабель разрешается производить только после полного завершения и приемки выполненных работ в соответствии с действующими требованиями.

Работы на линейно-кабельных сооружениях, выполняемые при замене основного технологического оборудования кабельных линий связи с переустройством или строительством промежуточных и конечных пунктов, относятся к реконструкции линейно-кабельных сооружений.

Замена устаревших оборудования, устройств, сооружений и кабельной арматуры, относящихся к линейно-кабельным сооружениям, с целью механизации трудоемких процессов, оснащения предприятий связи контрольной и измерительной аппаратурой, автоматизации управления оборудованием, повышения производительности труда, выполняемые без расширения производственных площадей и существенного переустройства зданий, относится к техническому перевооружению действующих предприятий.

Замена оборудования, не вошедшего в сметы, установка и монтаж которого производится эксплуатационными предприятиями без дополнительных затрат на строительно-монтажные работы, может относиться к техническому перевооружению в соответствии с планами технического перевооружения действующих предприятий.

К новому строительству относится сооружение кабельных линий по новым трассам с частичным использованием существующих или строительством новых узлов и станций.

Для осуществления постоянного контроля за строительством, реконструкцией, капитальным ремонтом и техническим перевооружением линейно-кабельных сооружений устанавливается технический надзор со стороны эксплуатационного предприятия.

Работы по переустройству, переносу, реконструкции, техническому перевооружению и строительству линейно-кабельных сооружений независимо от исполнителя должны приниматься заказчиком в соответствии с действующими требованиями по приемке междугородных кабельных линий связи в эксплуатацию.

В целях поддержания исправного состояния законченных строительством линейно-кабельных сооружений до решения Государственной комиссии о приемке в эксплуатацию объекта в целом, отдельные участки кабельных линий передачи (не менее одного элементарного участка) могут приниматься предприятиями, осуществляющими технический надзор, на ответственное хранение до приемки кабельных линий рабочей и Государственной комиссиями.

На ответственное хранение линейно-кабельные сооружения принимаются при условии их полного соответствия проектной документации, установленным техническим требованиям, при наличии исполнительной и фиксационной документации, протоколов электрических и оптических измерений параметров, и соответствующем обозначении трассы кабеля на местности.

Передача линейно-кабельных сооружений на ответственное хранение оформляется актом промежуточной приемки специальной комиссией, назначенной приказом по эксплуатационному предприятию.

Затраты эксплуатационных предприятий, связанные с ответственным хранением линейных сооружений, возмещаются заказчиком на строительство этих сооружений.

ТЕХНИЧЕСКИЙ НАДЗОР ЗА СТРОИТЕЛЬСТВОМ, РЕКОНСТРУКЦИЕЙ, ТЕХНИЧЕСКИМ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕМ И КАПИТАЛЬНЫМ РЕМОНТОМ ЛИНЕЙНО-КАБЕЛЬНЫХ 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 внутризоновых 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, исключаяющей 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 внутризоновых 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.

Основные принципы организации технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений связи

Техническую эксплуатацию линейно-кабельных сооружений магистральной и внутризоновых первичных сетей Российской Федерации организуют Минсвязи РФ и центры технической эксплуатации в соответствии с действующими правилами, руководствами, инструкциями и указаниями.

Техническая эксплуатация ЛКС магистральной и внутризоновых первичных сетей общего пользования РФ осуществляется эксплуатационно-техническими предприятиями:

- ✚ территориальными центрами междугородных связей и телевидения (ТЦМС) - филиалами АООТ "Ростелеком";
 - ✚ техническими узлами магистральных связей и телевидения (ТУСМ) - обособленными подразделениями ТЦМС;
 - ✚ сетевыми узлами связи (СУС) - подразделениями ТУСМ;
 - ✚ эксплуатационно-техническими узлами связи (ЭТУС);
 - ✚ районными узлами электросвязи (РУЭС).
- Задачи, функции и подчиненность этих предприятий определены соответствующими положениями о них.
- ✚ Основным производственным подразделением, осуществляющим техническую эксплуатацию линейно-кабельных сооружений магистральной и внутризоновых первичных сетей, являются цех линейно-кабельных сооружений (ЦЛКС) и линейно-технический цех (ЛТЦ).
 - ✚ Для осуществления контроля за электрическими и оптическими параметрами кабельных линий передачи, обеспечения внедрения новой техники, проверки и организации ремонта измерительной техники, оборудования электросвязи, автотранспорта и передвижных монтажно-измерительных машин в составе эксплуатационно-технического предприятия организуются следующие вспомогательные производственные подразделения:
 - ✚ производственная лаборатория;
 - ✚ мастерские или группы по ремонту оборудования и изготовлению приспособлений для линейных работ;
 - ✚ автотранспортный цех.

Все производственные подразделения должны иметь положения, а работники - должностные инструкции, разработанные на основе типовых инструкций с учетом характера выполняемой работы. Положения и инструкции должны четко определять обязанности, права, ответственность, подчиненность подразделений и работников, а также взаимоотношения их с другими подразделениями и работниками.

Общие задачи производственных подразделений по технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений

Основными задачами производственных подразделений, осуществляющих техническую эксплуатацию линейно-кабельных сооружений магистральных и внутризоновых линий передачи являются:

- ✚ обеспечение надежной и высококачественной работы обслуживаемых линейных сооружений;
- ✚ содержание линейных сооружений в соответствии с техническими нормами и требованиями;
- ✚ своевременное и высококачественное проведение работ по ремонту и повышению надежности линейных сооружений;
- ✚ проведение работы по обеспечению сохранности линейно-кабельных сооружений;
- ✚ обеспечение выполнения действующих положений, правил, руководств, инструкций, приказов и директивных указаний по вопросам технической эксплуатации линейных сооружений;
- ✚ проведение работ по сбору статистических данных о состоянии ЛКС и анализу качества и надежности работы ЛКС;
- ✚ ведение производственной документации и статистической отчетности в соответствии с утвержденными нормами и инструкциями.

Организация производственной деятельности в цехе линейно-кабельных сооружений (ЦЛКС, ЛТЦ)

Методы обслуживания линейно-кабельных сооружений зависят от условий прохождения трасс междугородных кабельных линий передачи, наличия и состояния дорог, расположения населенных пунктов и способов обеспечения надежной и высококачественной работы линейно-кабельных сооружений. Они определяются производственными подразделениями ТУСМ. Могут применяться следующие методы обслуживания:

централизованный, децентрализованный (участковый), комбинированный.

Централизованный метод обслуживания предполагает сосредоточение всех работников в пункте нахождения данного структурного подразделения (ЦЛКС, ЛТЦ). При значительной протяженности трасс кабельных линий, обслуживаемых ЦЛКС (ЛТЦ), в их составе могут создаваться отдельные бригады, за которыми закрепляются свои участки обслуживания.

Децентрализованный (участковый) метод обслуживания линейно-кабельных сооружений применяется в тех случаях, когда невозможен или существенно затруднен проезд вдоль трасс кабельных линий.

При использовании децентрализованного метода вся трасса кабельной линии разбивается на участки. Протяженность закрепленных за монтерами участков определяется руководителем ЦЛКС или ЛТЦ в зависимости от конкретных условий прохождения трассы и наличия у участковых монтеров средств передвижения (велосипеды, мотоциклы, мотонарты и др.).

Объем и перечень работ, выполняемых участковыми монтерами, определяется руководителем ЦЛКС или ЛТЦ на основе действующих нормативов.

Комбинированный метод обслуживания совмещает централизованный и участковый методы. Комбинированный метод обслуживания является наиболее прогрессивным в условиях труднодоступной для обслуживания трассы и позволяет оптимально использовать средства транспорта и механизации.

Количество и состав бригад и групп определяется начальником ЦЛКС (ЛТЦ) в пределах общего штата, утвержденного начальником предприятия(подразделения), в зависимости от объема работ, местных условий и оснащенности бригад средствами транспорта и механизации.

Основные функции бригад и групп ЦЛКС (ЛТЦ):

- ✚ проведение охранно-предупредительной работы;
- ✚ проведение текущего обслуживания ЛКС;
- ✚ проведение планово-профилактического обслуживания ЛКС;
- ✚ ремонт ЛКС в соответствии с планом;
- ✚ своевременное приведение в норму электрических и оптических параметров цепей линий передачи в процессе эксплуатации и после аварийно-восстановительных работ;
- ✚ проведение технического надзора при эксплуатации ЛКС;
- ✚ содержание закрепленного оборудования, приборов, инструмента и приспособлений в исправном состоянии;
- ✚ выполнение аварийно-восстановительных работ.

Организация оперативно-технического управления и диспетчерской службы эксплуатационно-технического предприятия

Для поддержания непрерывного оперативно-технического управления и контроля работы линейных сооружений первичной сети в эксплуатационно-техническом предприятии организуется диспетчерская служба.

Диспетчерская служба эксплуатационно-технического предприятия, расположенного в зоне деятельности узлового пункта управления (УПУ) первичной сети ВСС РФ, обязана выполнять все распоряжения и команды УПУ, касающиеся оперативно-технического управления первичной сетью.

Численный состав, режим работы и задачи диспетчерской службы эксплуатационно-технического предприятия определены "Инструкцией по аварийно-восстановительным работам на междугородных кабельных линиях связи" (М.: Радио и связь, 1978).

Ответственность за организацию и работу диспетчерской службы несет главный инженер эксплуатационно-технического предприятия.

Для оперативного контроля деятельности техперсонала подразделений и руководства аварийно-восстановительными работами используется служебная радиосвязь.

По прибытии ремонтной бригады к месту выполнения работ радиостанция должна быть развернута и проведена проверка связи с диспетчером или дежурным персоналом МТС (УП). После окончания проверки связи радиостанция должна находиться в режиме дежурного приема. Основные вопросы, связанные с применением служебной радиосвязи, подробно рассмотрены в "Руководстве по организации и эксплуатации служебной радиосвязи на междугородных линиях связи" (М.: МС СССР, 1985).

При отсутствии радиосвязи с диспетчером или дежурным персоналом МТС (УП) должна поддерживаться телефонная связь, организованная по специальной цепи, выделенной для этой цели, а в случае повреждения специальной цепи - с ближайшего УП.

Для оперативной связи диспетчера предприятия с дежурным персоналом МТС или УП используется междугородная телефонная связь, а там, где возможно - радиосвязь.

Задачи производственной лаборатории при технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений

На производственную лабораторию возложены следующие основные задачи:

- ✚ контроль за соблюдением правил технической эксплуатации средств связи персоналом структурных подразделений;
- ✚ контроль за соответствием параметров линейных сооружений связи установленным нормам и техническим условиям;
- ✚ сбор статистических данных по работе ЛКС, их анализ и разработка технических мероприятий по повышению надежности работы ЛКС;
- ✚ проведение плановых измерений параметров междугородных кабельных линий передачи, составление линейных паспортов;
- ✚ проведение мероприятий по защите линейно-кабельных сооружений от внешних электромагнитных влияний и ударов молнии;
- ✚ проведение мероприятий по защите линейно-кабельных сооружений от коррозии;
- ✚ осуществление надзора за правильной эксплуатацией измерительных приборов, проведение проверки их в установленные сроки и обеспечение организации ремонта;
- ✚ участие в приемке в эксплуатацию линейно-кабельных сооружений;
- ✚ проведение анализа производственных процессов и внесение предложений по улучшению организации технической эксплуатации линейных сооружений, участие в составлении рекомендаций, инструкций и руководств;
- ✚ изучение научно-технической информации о совершенствовании технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений;
- ✚ обеспечение внедрения новой техники, предложений и рекомендаций, направленных на совершенствование технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений;
- ✚ проведение организации, ремонта и развития служебной радиосвязи.

Производственная документация

Все эксплуатационные предприятия и их филиалы должны иметь основные нормативные документы по эксплуатации линейно-кабельных сооружений и вести производственную документацию с целью систематического анализа состояния линейно-кабельных сооружений, причин, характера и длительности повреждений и аварий, а также накопления необходимого статистического материала.

Перечень обязательной производственной документации, хранящейся на предприятии (филиале) и в структурных подразделениях определяется перечнем, утвержденным главным инженером предприятия (филиала).

Производственная документация по эксплуатации линейно-кабельных сооружений подразделяется на нормативно-справочную, оперативно техническую, техническую, приемосдаточную и организационную.

В состав нормативно-справочной документации входят: государственные и отраслевые стандарты предприятий, правила, инструкции, положения, рекомендации, распорядительные документы, нормативно-технические и руководящие указания Минсвязи РФ.

Оперативно-техническая документация составляется и ведется работниками эксплуатационных предприятий в процессе обслуживания линейно-кабельных сооружений.

В состав оперативно-технической документации входят:

- ✚ паспорта (планшеты) кабельных трасс;
- ✚ протоколы измерений электрических и оптических параметров кабелей связи; протоколы и журналы по измерениям параметров, характеризующие защиту кабелей от коррозии и внешних электромагнитных влияний;
- ✚ протоколы и журналы проверки системы содержания кабелей под избыточным воздушным давлением;
- ✚ паспорта заземляющих устройств;
- ✚ протоколы измерений заземляющих устройств;
- ✚ документация по охранно-предупредительной работе;
- ✚ акты повреждений и аварий на линейно-кабельных сооружениях;
- ✚ статистическая документация по эксплуатации линейно-кабельных сооружений.

В состав технической документации входят: паспорта, формуляры, технические описания на оборудование, механизмы, приборы, паспорта (сертификаты) на кабельные изделия.

В состав приемосдаточной документации входит документация, предъявляемая строительными организациями при сдаче в эксплуатацию вновь построенных или реконструированных линейно-кабельных сооружений. Порядок и объем подготовки приемосдаточной документации определяется действующими указаниями по сдаче объектов в эксплуатацию и требованиями по ее составлению.

К организационной документации относятся: положения о службах (отделах) и структурных подразделениях (ЦЛКС, ЛТЦ);

должностные инструкции работников; приказы и распоряжения по предприятию по эксплуатации ЛКС; планы и отчеты о их выполнении;

журналы учета и планы проведения технической учебы; документация по охране труда и технике безопасности; другая организационная документация.

Конкретные формы документации, порядок их заполнения и хранения определяются соответствующими Инструкциями и приказами по предприятию.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЛИНЕЙНО-КАБЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

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 (согласования) 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 (см. Приложение Б).

Оперативный контроль технического состояния линейно-кабельных сооружений

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 линейно-кабельных сооружений

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.

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 электропитания;
- ✚ 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.

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 объёме.

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, подъёмах, 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 объёме.

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 надёжности 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 оконечных 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.