

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к проведению практических занятий
по дисциплине

**«Направляющие среды в сетях электросвязи
и методы их защиты»**

для студентов очной и заочной форм обучения
Направление подготовки 11.03.02
Инфокоммуникационные технологии и системы связи
профиль Защищенные инфокоммуникационные системы

Ростов-на-Дону

2022

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к проведению практических занятий по дисциплине

«Направляющие среды в сетях электросвязи
и методы их защиты»

Составитель: И.А. Енгибарян, доцент кафедры ИТСС

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры ИТСС
Протокол №5 от 19.12.2022

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НСЭ

ЦЕЛЬ занятия: выработать умения и навыки расчета элементов конструкций направляющих сред связи (электрические кабели связи).

Рекомендации: изучить Главу 3 с.44-55 [1], а также с 9-16 [2]

Примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения представлены в[2].

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Умение производить расчеты элементов конструкций симметричных кабелей особенно необходимо специалистам в области городских кабельных сетей. Это обусловлено тем, что существует большое разнообразие типов городских низкочастотных симметричных кабелей, использующих различные методы скрутки проводников. От того, какой вид скрутки был использован, зависит степень широкополосности кабеля, и чувствительность к взаимным влияниям. При выборе групп симметричных пар, подверженных наименьшим влияниям, следует не только вспомнить методы образования повивов кабеля, но и рассчитать диаметр искомого повива или других элементов конструкции кабеля.

В симметричных кабелях применяется несколько способов скрутки изолированных проводников в группы: парная скрутка (П), скрутка звездная (З), скрутка двойная парная (ДП), скрутка двойная звездная (ДЗ).

Контрольные вопросы

1. Типы и конструкции городских и междугородных симметричных и коаксиальных кабелей связи.
2. Типы скрутки жил в группы.
3. Сравните различные виды кабельной скрутки жил в группы и групп в сердечник.
4. Покровы броневого кабеля.
5. Основные принципы маркировки кабелей связи.
6. Методы образования повивов кабелей.
7. Почему в кабелях связи применяется воздушно-комбинированная изоляция проводников?
8. Достоинства и недостатки алюминиевых оболочек.
9. Геометрические размеры кабеля.

СИММЕТРИЧНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

Элементы конструкции симметричных кабелей связи

Краткие сведения из теории

При повивной скрутке кабельного сердечника длина изолированных проводников второго, третьего и так далее повивов увеличивается по сравнению с длиной самого кабеля. Отношение длины проводников в повиве к длине кабеля задает коэффициент укрутки, который вычисляется по формуле:

$$\chi = \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{D}{h} \right)^2}, \quad (1.1)$$

где D – средний диаметр кабельной скрутки, мм;
 h – шаг скрутки, мм.

Под средним диаметром кабельной скрутки понимается диаметр окружности, проведенный через центры сечения групп соответствующих повивов, как показано на рисунке 1.1.

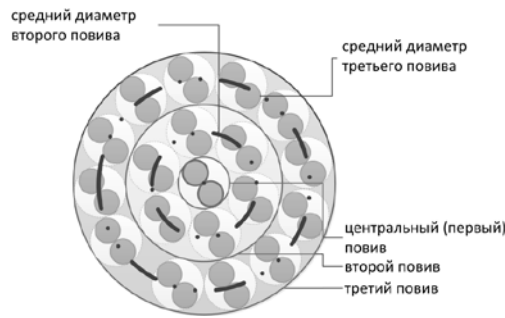


Рисунок 1.1

Диаметр центрального повива, если в нем от 2 до 5 пар, вычисляется по формуле:

$$D = d \left[1 + \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \right], \text{ мм} \quad (1.2)$$

где d – диаметр группы, мм;

n (от 2 до 5) – число групп в центральном повиве.

Число пар в повивах определяется по следующей эмпирической формуле

- если в центральном повиве две и более пары:

$$m' \approx m + 6;$$

- если в центральном повиве одна пара, то число пар во втором повиве:

$$m' \approx m + 5;$$

в остальных повивах:

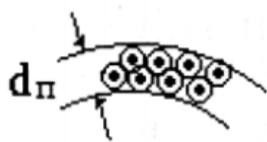
$$m' \approx m + 6,$$

где m – число пар в предыдущем повиве.

Если изоляция проводников воздушно-бумажная, при ее скрутке происходит деформация проводников, в результате чего на практике размеры скрученных групп становятся меньше расчетных. В этом случае рассчитываются эффективные диаметры групп.

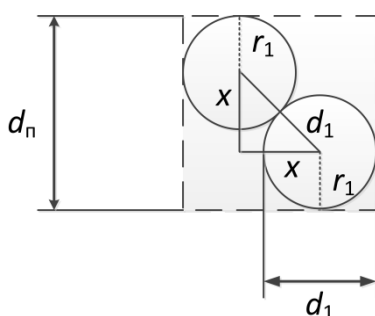
Скрутка	Парная	Звездная	Двойная парная	Двойная звездная	Восьмерочная
Эффективный диаметр	$0,965 d_n$	$0,909 d_3$	$0,956 d_{он}$	$0,980 d_{оз}$	$0,983 d_6$

Решение типовых задач



1. Геометрические размеры кабеля зависят от диаметра группы, образующей основополагающую единицу конструкции. В случае парной скрутки толщина, прибавляемая каждым повивом к диаметру кабеля, будет равна средней ширине пространства, занимаемого парой. И в то же время эта толщина не будет равна

двойному диаметру изолированной жилы $2d_1$. Вывести формулу для расчета толщины повива (диаметра группы) для парной скрутки.



Толщину повива, состоящего из проводников парной скрутки $d_п$ легко найти, определив катеты прямоугольного равнобедренного треугольника, гипотенузой которого является расстояние, равное диаметру изолированного проводника d_1 .

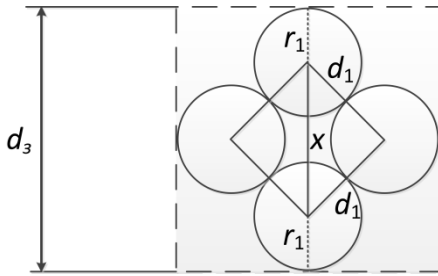
По теореме Пифагора (см. рисунок): $d_1^2 = x^2 + x^2 = 2x^2$. Откуда.

$$x = \frac{d_1}{\sqrt{2}}$$

Диаметр парной скрутки:

$$d_n = 2r_1 + x = d_1 + x = d_1 + \frac{d_1}{\sqrt{2}} = d_1 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 1,71d_1.$$

2. Вывести формулу для расчета толщины повива (диаметра группы) для звездной скрутки.



Толщину повива, состоящего из проводников парной скрутки d_3 легко найти, определив гипотенузу прямоугольного равнобедренного треугольника, катетами которого являются расстояния, равные диаметру изолированного проводника d_1 .

По теореме Пифагора (см. рисунок): $x^2 = 2d_1^2$. Откуда $x = \sqrt{2}d_1$.

Диаметр звездной скрутки:

$$d_3 = 2r_1 + x = d_1 + x = d_1 + \sqrt{2}d_1 = d_1(1 + \sqrt{2}) = 2,41d_1.$$

3. Во сколько раз отличается толщина повивов, состоящих из двух разных типов групп проводников, если в первом случае использована парная скрутка, во втором – звездная? На сколько изменится это соотношение в случае дополнительного обжима бумажной изоляции?

Используя данные, полученные в задачах 1 и 2, имеем:

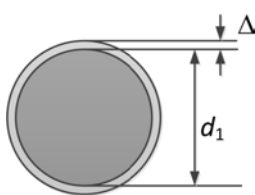
$$\frac{d_n}{d_3} = \frac{1,71d_1}{2,41d_1} = 0,71.$$

Таким образом, толщина повива, состоящего из проводников парной скрутки, будет в 0,71 раза меньше толщины повива звездной скрутки.

При дополнительном обжиме:

$$\frac{d_n}{d_3} = \frac{0,965d_n}{0,909d_3} = \frac{0,965}{0,909} \cdot 0,71 = 0,75.$$

При дополнительном обжиме толщина повива, состоящего из проводников парной скрутки, будет в 0,75 раз меньше толщины повива звездной скрутки.



4. На сколько процентов отличается длина проводников, используемых во втором и четвертом повивах кабеля ТГ 100х2х0,5. Шаг скрутки жил 100 мм.

Диаметр изолированного проводника:

$$d_1 = d + 2\Delta = 0,5 + 2 \cdot 0,05 = 0,6 \text{ мм.}$$

Диаметр группы (пары):

$$d_n = 1,71d_1 = 1,71 \cdot 0,6 = 1,026 \text{ мм.}$$

Диаметр центрального повива при $n=2$:

$$D = 1,026 \left[1 + \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{2}} \right] = 1,026 \left[1 + \frac{1}{\sin(90^\circ)} \right] = 1,026 \cdot 2 = 2,052 \text{ мм.}$$

Средние диаметры (диаметр окружности, проведенный через центры сечения групп соответствующих повивов):

- для 2 повива $D_2 = D + d_n = 2,052 + 1,026 = 3,078 \text{ мм}$;

- для 4 повива $D_4 = D + 5d_n = 2,052 + 5 \cdot 1,026 = 7,182 \text{ мм}$.

Коэффициенты укрутки проводников:

- для 2 повива: $\chi_2 = \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{D_2}{h} \right)^2} = \sqrt{1 + 3,14^2 \left(\frac{3,078}{100} \right)^2} = 1,005$;

- для 4 повива $\chi_4 = \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{D_4}{h} \right)^2} = \sqrt{1 + 3,14^2 \left(\frac{7,182}{100} \right)^2} = 1,025$.

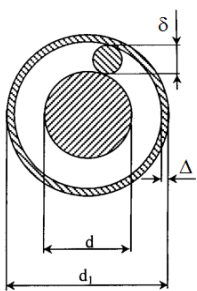
Длина скрученных жил в повивах по отношению к длине кабеля L :

- вторым $L_2 = \chi_2 L = 1,005 \cdot L$;

- четвертом $L_4 = \chi_4 L = 1,025 \cdot L$.

Длина жил в четвертом повиве превышает длину жил во втором повиве на

$$\frac{L_4}{L_2} = \frac{1,025 \cdot L}{1,005 \cdot L} \cdot 100\% = 101,99\%.$$



5. Найти расстояния между центрами пар проводников, находящихся внутри четверки МКС-7х4х1,2. Определить диаметр звездной группы.

Диаметр изолированной жилы:

➤ **Указание:** парой проводников в четверке называются противоположно расположенные проводники внутри четверки.

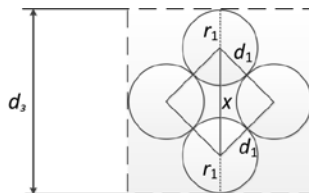
$$d_1 = d + 2\delta + 2\Delta = 1,2 + 2 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,05 = 2,9 \text{ мм}.$$

Расстояние между парами соответствует величине x .

По теореме Пифагора: $x^2 = 2d_1^2$. Откуда

$$x = \sqrt{2} d_1 = 1,41 \cdot d_1 = 4,09 \text{ мм}.$$

Диаметр звездной группы $d_s = 2,41d_1 = 6,99 \text{ мм}$.



Задачи для самостоятельного решения

1. Определить, сколько килограмм меди и свинца находятся в строительной длине кабеля ТГ 10х2х0,5.

2. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с кордельно-бумажной изоляцией МКГ 4х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

3. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с кордельно-бумажной изоляцией МКПГ 4х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

4. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле со сплошной полиэтиленовой изоляцией МКПВ 4х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

5. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с пористо-полиэтиленовой изоляцией МКПП 1х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

6. На сколько процентов отличается расстояние между центрами пары проводников четверок кабелей МКПГ 4х4х1,2 и МКПГ 4х4х1,05?

Литература

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи. В 2 т. Том 1. Теория передачи и влияния: Учебник для вузов / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов и др. - 7-е изд., перераб. и доп. - Москва : Гор. линия-Телеком, 2011. —424 с.; . ISBN 978-5-9912-0092-9, 1000 экз. – Текст : электронный. – URL: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=256974>
2. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. : Учебное пособие для вузов.-М. Горячая линия -Телеком 2009 г.-268с.;ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЛИНИИ СВЯЗИ И МЕРЫ ЗАЩИТЫ

ЦЕЛЬ занятия: изучить электромагнитные влияния между симметричными и коаксиальными цепями; выработать навыки расчета электрического и магнитного влияний на НСЭ; изучить методы расчета и измерений величины ЭДС в кабелях связи при опасном магнитном влиянии и меры защиты кабельных магистралей.

Рекомендации: изучить Главу 9 с.309-352 [1], Гл.10 с.353 – 410

Примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения представлены в[2] с.245-264.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Цепи и тракты НС постоянно находятся под воздействием сторонних электромагнитных полей того или иного происхождения. Различают две основные группы источников сторонних полей: внешние энергетически и конструктивно не связанные с линией связи – и внутренние – соседние физически и искусственные цепи данной линии связи.

Внешние источники помех по своему происхождению делятся на:

естественные – грозовые разряды, солнечная радиация, космическое излучение, магнитные бури; созданные человеком – высоковольтные линии передачи, радиостанции различного назначения, линии электрифицированных железных дорог, метро и трамвая, электрические сети промышленных предприятий и отдельных энергоемких устройств.

Сторонние электромагнитные поля индуцируют в цепях и трактах линий связи помехи, которые не только снижают качество передачи, но иногда возбуждают большие напряжения и токи, приводящие к разрушению линий связи и аппаратуры, а также создающие опасность для жизни и здоровья эксплуатационного персонала. Поэтому для оценки свойств линий связи помимо изучения законов передачи сигналов необходимо также исследование процессов, связанных с воздействием сторонних электромагнитных полей на НС и методы защиты. Указанные воздействия называют электромагнитными влияниями или просто влияниями на цепи НС.

Данная проблема является общей для всех систем и устройств, связанных с генерацией, передачей, приемом и обработкой электрических сигналов и называется проблемой электромагнитной совместимости. Сущность ее состоит в том, что в процессе проектирования, строительства и эксплуатации вышеуказанных устройств и систем необходимо учитывать, с одной стороны, воздействие на них сторонних электромагнитных полей заданного характера и обеспечить достаточную для их нормальной работы защиту от этих воздействий, а с другой – предусмотреть мероприятия по ограничению уровней влияния электромагнитных полей проектируемых устройств и систем на другие устройства допустимыми значениями.

Проблема электромагнитной совместимости требует нахождения оптимального решения обеих задач. В результате становится возможной совместная эксплуатация высоковольтных ЛЭП, промышленных установок, радиостанций и НС.

Источники и классификация внешних влияний

Источниками внешних влияний на цепи связи являются линии электропередачи (ЛЭП), электрифицированные железные дороги (эл.ж.д), мощные радиостанции (РС),

атмосферное электричество, промышленные помехи, электрифицированный городской транспорт и др..

Электромагнитное влияющее поле в общем случае может содержать как поперечные (E_1 и H_1), так и продольные (E_z и H_z) компоненты. Влияния поперечного электромагнитного поля проявляются при асимметрии проводников в поперечном сечении кабеля. Влияние продольного поля проявляется при продольной омической асимметрии проводников, а также при ёмкостной асимметрии цепей относительно оболочки (рис. 2.1). При внешних влияниях преобладает влияние продольных компонент.

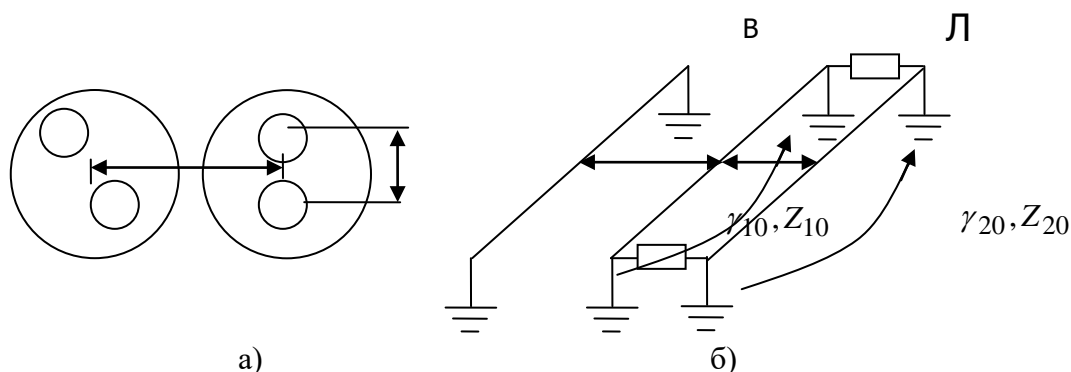


Рисунок 2.1 – Влияние за счёт поперечного а) и продольного б) полей

При внешних влияниях источники полей, как правило, находятся на достаточном удалении от цепей связи ($b \gg a$).

В этом случае влияния определяются также различием постоянных составляющих отдельных участков цепи, и влияния возникают в цепи «проводник – земля» (оболочка).

Для внешних влияний характерны:

- разные длины влияющих, подверженных влиянию и третьих цепей;
- малое затухание источников влияний (ВВЛ, эл.ж.д.).

Различают следующие виды внешних влияний (рис. 2.2):

- электрическое, обусловленное действием электрической составляющей поля;
- магнитное, обусловленное действием магнитной составляющей поля;
- гальваническое, появляющееся вследствие наличия в земле блуждающих токов; эти токи создаются ВВЛ, использующими землю в качестве обратного провода, заземлителями.

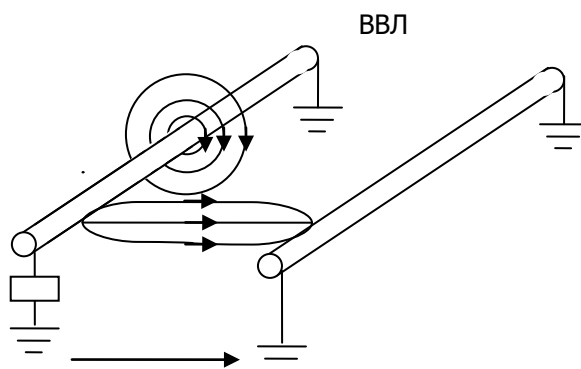


Рисунок 2.2 – Виды внешних влияний: E – электрическое, H – магнитное, I – гальваническое; ВЛ- высоковольтная линия, ЛС – линия связи

По степени интенсивности влияния делятся на опасные и мешающие.

Опасные влияния угрожают жизни обслуживающего персонала и могут привести к повреждению аппаратуры. Опасным считается напряжение $U > 36 В$ и ток $I > 15 мА$.

Мешающие влияния приводят к появлению помех, шумов, искажений, нарушению нормальной работы средств связи; мешающими считаются напряжение $U \approx 1...2 мВ$, ток $I \approx 1 мА$.

Внешние влияния подразделяются на длительные ($t > 1с$) и кратковременные ($t < 1с$).

Действия внешних источников бывают как постоянными, так и случайными.

Внешние влияния, в зависимости от их природы, действуют как на металлические кабели, так и на оптические.

Влияние атмосферного электричества

Опасному влиянию атмосферного электричества подвергаются как воздушные, так и кабельные линии связи. На территории Украины грозы наблюдаются повсеместно, число грозовых дней в году в отдельных районах в среднем достигает 25 – 30.

Вероятное число повреждений кабелей молнией характеризуется плотностью повреждений – общим числом отказов в связи, отнесённых к 100 км. трассы кабельной

линии в год и определяется формулой

$$n = \frac{N}{KL} \cdot 100$$

где N – общее число опасных попаданий молнии в кабель; K – период, за который произошло N повреждений, лет; L – длина трассы, км.

Опасность повреждения кабельной линии зависит от состояния грунта и проводимости оболочки кабеля. Опасность повреждения кабеля возрастает в грунтах с большим сопротивлением (песке, глине и др.) и при больших сопротивлениях оболочки. Опасность повреждения кабеля с алюминиевой оболочкой меньше, чем со стальной. На оптические кабели, имеющие металлические оболочки и металлические бронепокрытия, атмосферное электричество действует также, как и на обычные кабели. Оптические кабели имеют чаще всего гофрированные алюминиевые оболочки, что снижает вероятность повреждения этих кабелей атмосферным электричеством.

Молния – электрический разряд через воздух. Путь, образованный разрядом атмосферного электричества, называется каналом молнии. Канал молнии имеет примерно следующие параметры:

- напряжение до $10^3 - 10^6 В$;
- ток в канале до 20 – 30 кА;
- длительность удара 0,3 – 0,5 с;
- основная частота колебаний 5 – 10 кГц;
- длина канала молнии 2 – 3 км;
- температура в канале до $20000^{\circ}C$.

На проводах воздушных линий связи вследствие электростатической индукции при грозовых разрядах возникает высокое напряжение, что представляет опасность для станционной аппаратуры. При прямом попадании молнии в ВЛС могут расплавиться её провода, опоры же при прямом попадании молнии разрушаются. Для защиты ВЛС от атмосферного электричества применяется каскадная защита, молниеотводы.

Повреждения кабеля от попадания молнии следующие:

- расплавление свинцовой оболочки под действием высокой температуры;
- обгорание изоляции, внешних неметаллических покрытий;

- расплавление жил кабеля;
- разрушение внешней металлической оболочки на расстоянии до 10 м от места прямого попадания молнии, образование вмятин, прогибов вследствие расширения образовавшихся от горения газов;
- пробой изоляции кабеля.

Молнией чаще поражаются высокие наземные предметы, поэтому кабель прокладывается на расстоянии $h \approx 20 \text{ м}$ от кромки леса или от одиноко стоящих деревьев. При попадании молнии в дерево возникают значительные токи, которые могут попасть через корни деревьев на кабель (рис. 2.3).

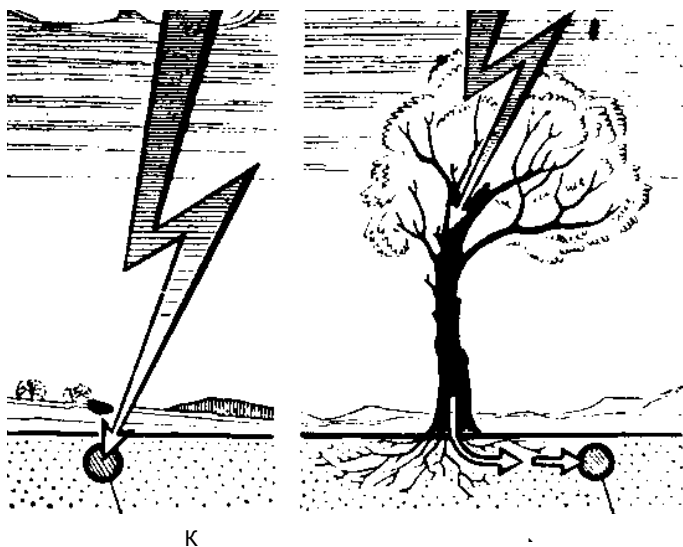


Рис. 2.3 – Действие молнии на кабель: а) непосредственное попадание; б) через дерево

Для уменьшения опасного воздействия атмосферного электричества на ЛС проводятся следующие мероприятия:

- применение грозостойких кабелей с повышенной проводимостью оболочки (алюминиевой, медной) и с повышенной изоляцией;
- включение в монтажных муфтах малогабаритных разрядников;
- применение грозозащитных тросов, которые прокладываются над кабелем;
- на волоконно–оптических линиях связи целесообразно применение ОК, не содержащих металлических элементов;
- на станционных сооружениях устанавливаются молниеотводы, вертикальные вводы и аппаратура защищаются также разрядниками.

Влияние радиостанций на линии связи

Радиостанции оказывают мешающее влияние на высокочастотные каналы связи, если их рабочие частоты совпадают с диапазоном ВЧ систем.

На ЛС оказывают непосредственное влияние радиостанции длинноволнового (30 – 300 кГц) и средневолнового (300 – 3000 кГц) диапазонов. Больше всего подвержены влиянию радиостанций вертикальные провода – вводы цепей в станцию. Наиболее мощными являются радиостанции, работающие на большие расстояния.

Степень мешающего влияния радиостанций зависит от следующих факторов:

- излучаемой радиостанцией мощности;
- взаимного расположения ЛС и радиостанции;
- проводимости земли.

Радиостанции создают вертикальную составляющую электромагнитного поля (рис. 2.4) затухающую по закону, мВ/м:

$$E_{\text{в}} = \frac{2.45 \sqrt{P_{\text{изл}}}}{r} F \cdot e^{-K_{\text{д}} r},$$

где P – мощность излучения радиопередатчика; $K_{\text{д}} = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ – волновое число для свободного пространства; F – коэффициент ослабления поля за счёт земли; r – расстояние от радиостанции до линии, км.

За счёт конечной проводимости земли появляется горизонтальная составляющая (рис. 9.4) поля, мВ/м:

$$E_{\text{г}} = E_{\text{в}} / \sqrt{60 \lambda \sigma_{\text{з}}},$$

где λ – длина волны, м; $\sigma_{\text{з}}$ – проводимость земли, См/м.

Этой составляющей определяются помехи в линии связи. Мешающее влияние увеличивается при увеличении частоты и уменьшении проводимости земли. Наибольшее влияние возникает в кабелях, проложенных в грунтах с высоким сопротивлением (глина, пески, скальные грунты). Грунты с высокой проводимостью экранируют в некоторой степени горизонтальную составляющую электрического поля.

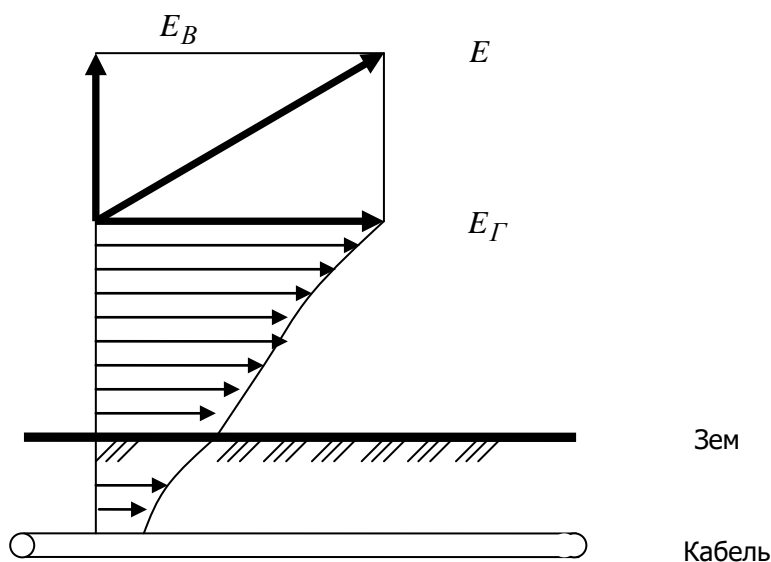


Рисунок 2.4 – Влияние радиостанций на ЛС

Взаимное расположение ЛС и радиостанции существенно сказывается на интенсивности влияния. Это расположение характеризуется углом взаимного расположения φ (рис. 2.5). В этом случае справедливо.

$$E_{Г\varphi} = E_{Г} \cos \varphi$$

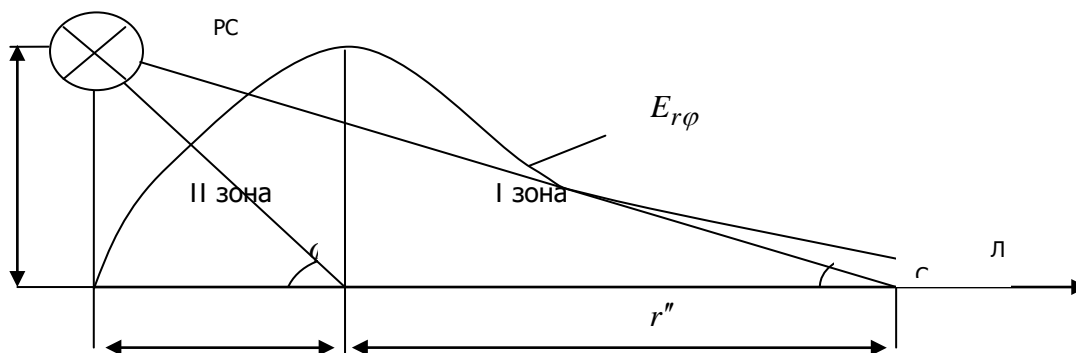


Рисунок 2.5 – Влияние радиостанций на ЛС при различных длинах линии

При перпендикулярном расположении ЛС относительно направления распространения поля радиостанции влияние минимально, максимальное влияние возникает при совпадении трассы ЛС и направления распространения волны передатчика радиостанции.

Из рисунка 9.6 следует, что существует для зоны влияния. В зоне I, $\varphi = 90^\circ - 50^\circ$ с увеличением $r^{E_{Г\varphi}}$ увеличивается, соответственно увеличиваются влияния. Во второй зоне при увеличении расстояния r влияния уменьшается. Максимальное влияние возникает при $\varphi = 40^\circ \div 50^\circ$.

Зона действия радиостанции на симметричный кабель составляет 3,5 – 8 км. в зависимости от материала оболочки, на коаксиальный - до 3,5 км, на оптический кабель радиостанция, естественно, не действует. На ВЛС зона влияния радиостанции составляет 500 – 1000 км.

ВВ.Л4 Влияние линий электропередачи

ЛЭП делятся на линии постоянного тока и линии переменного тока. Напряжения ЛЭП постоянного тока: 400; 500; 600; 800; 1000 кВ.

Линии электропередачи переменного тока используют, как правило, трехфазный ток (рис 2.6). Напряжение ЛЭП переменного тока: 3,3; 6,6; 11; 35; 220; 500 и 750 кВ.

Влияния, оказываемые ЛЭП на линии связи могут быть электрическими и магнитными. Электрическое влияние создаётся ЛЭП с большими напряжениями, малыми токами и большим волновым сопротивлением. Магнитное влияние создаётся ЛЭП с малым волновым сопротивлением, эти линии имеют относительно малое напряжение и большие токи.

Симметричные ЛЭП создают большие электрические влияния, несимметричные ЛЭП в аварийном режиме имеют большие уравнивающие токи и создают сильные магнитные поля.

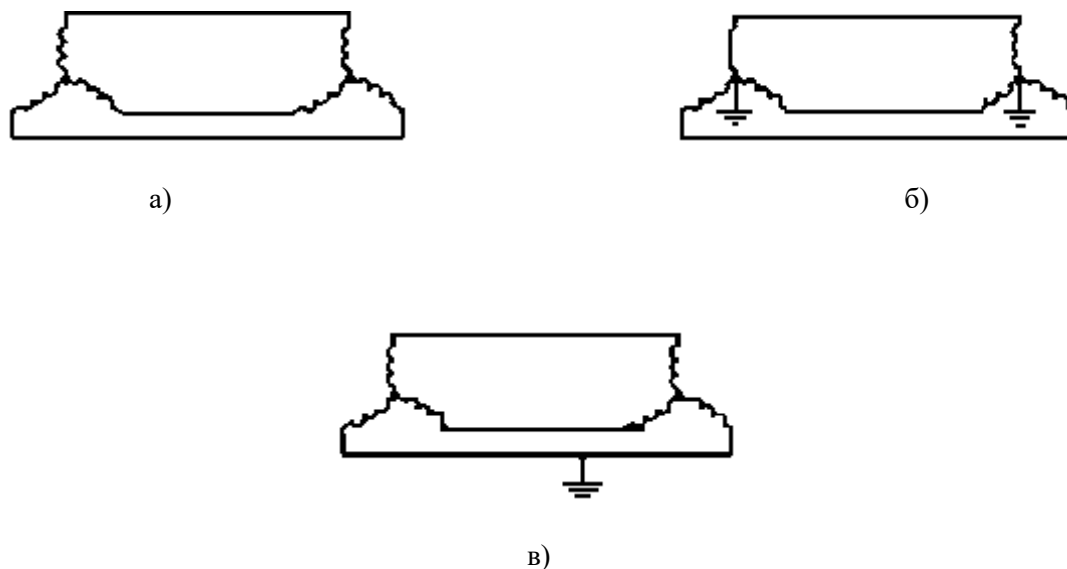


Рисунок 2.6 – Режимы работы ЛЭП: а) симметричный с изолированной нейтралью; б) симметричный с заземлённой нейтралью; в) несимметричный «два провода - земля»

Различают нормальный, вынужденный и аварийный режимы работы ЛЭП.

В нормальном режиме линия работает постоянно.

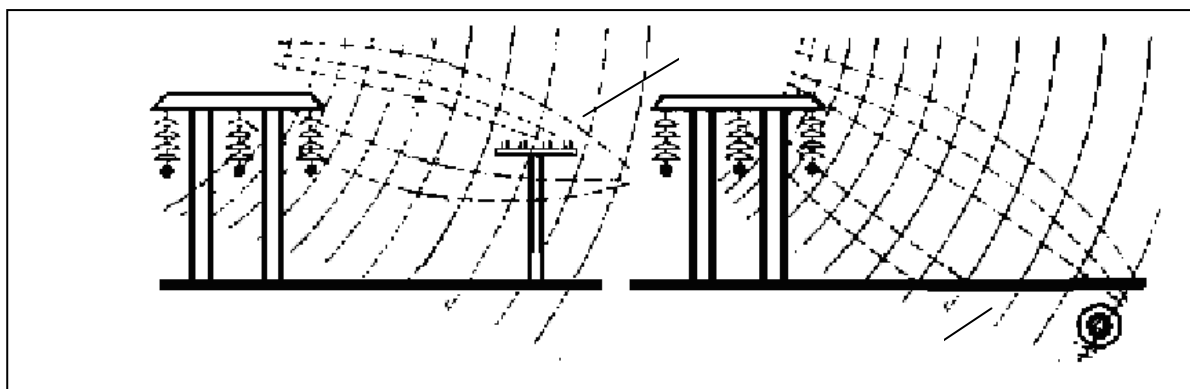
Вынужденный режим – это тот, при котором линия работает определённый промежуток времени в режиме, отличающемся от нормального. Аварийный режим возникает, например, при обрыве и падении на землю (заземлении) провода одной из фаз трехфазной линии с заземлённой нейтралью, что эквивалентно короткому замыканию в линии. При заземлении одной из фаз линии с изолированной нейтралью возникает неуравновешенное напряжение, равное $1,73$ линейного.

Линии постоянного тока действуют в диапазоне частот $0...30$ кГц, что объясняется наличием пульсаций в выпрямленном токе, они создают как опасное, так и мешающее влияние. Линии переменного тока создают влияния на частотах, кратных 50 Гц. Это объясняется неидеальностью генераторов переменного тока и отличием его формы от идеальной синусоиды. Кратные гармоники действуют на каналы тональной частоты.

Воздушные линии связи подвержены как электрическим, так и магнитным влияниям. На кабельные линии в большей мере действуют магнитные поля, электрическое поле в значительной мере ослабляется поверхностью земли. На кабельные линии с оптическим кабелем ЛЭП влияния не оказывают (рис 2.7).

В настоящее время для организации волоконно – оптических линий связи используются опоры линий электропередачи. В этом случае оптические кабели подвешиваются на опорах ЛЭП. Разработаны различные технологии таких линий связи: ОК навивается на грозозащитный трос, волоконные световоды вмонтированы в грозозащитный трос. В таких линиях на кварцевое волокно действует высокая напряжённость

электрического поля, что приводит к некоторому изменению показателя преломления, возможному изменению структуры стекла. Однако эти влияния возникают при больших напряжённостях электрического поля ($E > 10 \text{ кВ/м}$).



а)

б)

Рисунок 2.7 – Особенности влияния на линии связи:

а) воздушные; б) кабельные

Влияние электрифицированных железных дорог и городского электротранспорта

Контактные сети магистральных и пригородных электрифицированных железных дорог и городского электротранспорта также оказывают влияния на линии связи. Напряжение в контактных сетях постоянного тока:

- городской электротранспорт – 600 В, постоянный ток;
- пригородные эл.ж.д. – 3,3 кВ, постоянный ток;
- магистральные эл.ж.д. – 25 кВ, переменный ток.

Линии электрифицированного транспорта являются однопроводными несимметричными системами с использованием земли (рельсов) в качестве обратного провода, в котором протекает сильный неуравновешенный ток и возникает сильное магнитное влияние. Ток в контактных сетях эл.ж.д. в нормальном режиме достигает нескольких сотен ампер. Электрифицированный транспорт создаёт как опасное, так и мешающее влияния. Кроме магнитного влияния эти системы создают гальваническое влияние, т. к. являются источниками сильных блуждающих токов.

Линии электрифицированных железных дорог переменного тока влияют в основном на частоте 50 Гц и в диапазоне тональных частот. Линии постоянного тока действуют как в диапазоне тональных частот, так и на частотах до 30 кГц.

Линии эл.ж.д. оказывают большее влияние, чем ЛЭП. Влияние на кабельные и воздушные линии, такое же, как и влияние ЛЭП. На волоконно – оптические линии связи эти линии действия не оказывают.

Расчёт опасного магнитного влияния

Опасное магнитное влияние создают несимметричные системы (линии электропередачи, эл.ж.д.) как в нормальном так и в аварийном режимах. Магнитное влияние характеризуется продольной ЭДС, которая наводится на внешней металлической оболочке кабеля магнитным полем, В:

$$E_z = \omega m l I S, \quad (2.1)$$

где I – влияющий ток, А; $\omega = 2\pi f$, $f = 50 \text{ Гц}$ – частота влияния; l – длина участка сближения ЛС и ЛЭП, км; S – коэффициент экранирования линии; m – магнитная связь между ВВЛ и ЛС, Гн/км

$$m = \left[\ln \frac{2}{1,75ka} + 1 \right] \cdot 10^{-4}, \quad (2.2)$$

где $k = \sqrt{\omega \mu_z \sigma_z}$, μ_z и σ_z – магнитная проницаемость и проводимость земли, a – эквивалентная ширина сближения между ВВЛ и ЛС (рис. ВВЛ.8). Обычно сближение ВВЛ и ЛС непараллельное, при расчётах оно заменяется эквивалентным ему параллельным сближением.

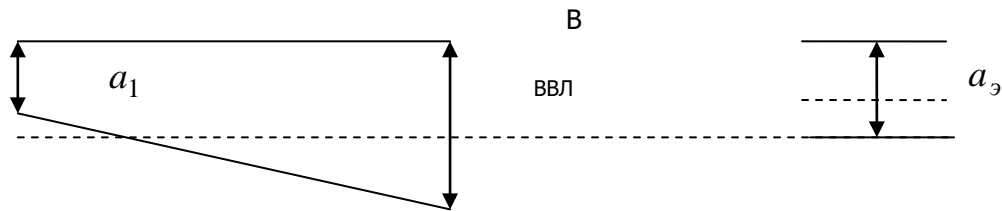


Рисунок 2.8 – Сближение ВВЛ и ЛС: а) косое; б) эквивалентное параллельное

Эквивалентное параллельное сближение определяется формулой:

$$a_{\text{э}} = \sqrt{a_1 a_2}.$$

В случае сложной трассы сближения (рис. 9.9) продольная ЭДС рассчитывается по эквивалентным участкам сближения и затем производится суммирование по всем участкам сближения.

$$E_z = \omega I_1 \sum_{i=1}^n m_i l_i S_i, \quad (2.3)$$

где n – число участков сближения, остальные величины соответствуют (ВВЛ1). Коэффициент экранирования S_i определяется общим экранирующим действием троса S_T , рельсов S_P :

$$S_i = S_T + S_p$$

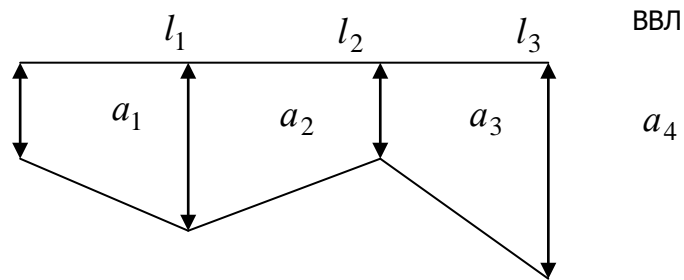


Рисунок 2.9 – Сложная трасса сближения

При проведении практических расчётов обычно пользуются номограммами для определения m_i . Влияние растёт с увеличением длины линии, величины влияющего тока и проводимости грунта. Продольная ЭДС не должна превышать напряжение дистанционного питания.

Защита линий связи от внешних влияний

Для предохранения сооружений связи от внешних электромагнитных влияний проводится комплекс защитных мер как на влияющих линиях (ЛЭП, эл.ж.д., радиостанции), так и на линиях связи (табл. ВВЛ-1).

Экранирующие тросы являются эффективным средством защиты кабелей связи от воздействия высоковольтных линий, атмосферного электричества и радиостанций. Наряду с экранирующими оболочками защитное действие оказывают также тросы, навешиваемые на влияющих линиях и прокладываемые над кабелем (рис. 2.10 а). Принцип действия экранирующего троса виден из рисунка (2.10 б).

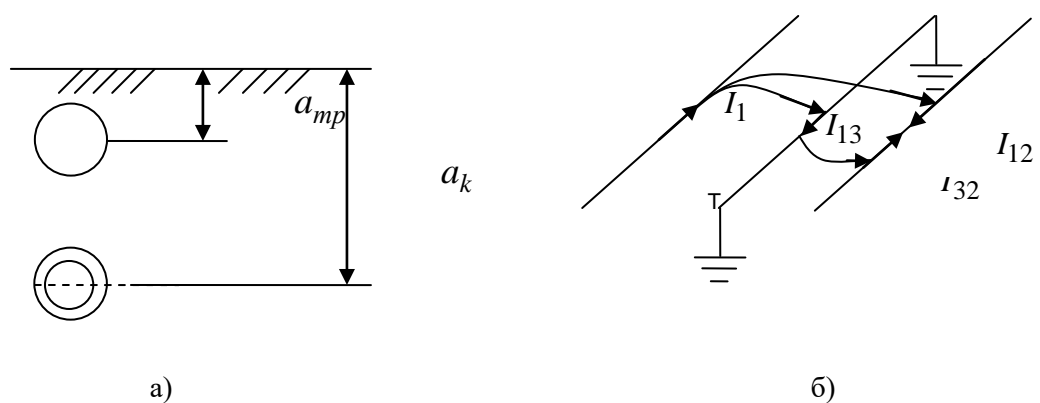


Рисунок 2.10 – Схема расположения троса и кабеля а);

принцип экранирующего действия троса б)

При протекании по ВВЛ в тросе и в линии связи индуцируются соответственно токи I_{13} и I_{12} . Но ток троса I_{13} наводит в линии ток I_{32} , противоположно направленный току I_{12} и в итоге ток в линии связи уменьшается $I_{рез} = I_{12} - I_{32}$. Эффективность экранирующего действия троса тем выше, чем меньше его сопротивление и лучше он заземлён. Обычно $S_T = 0,5 - 0,6$, а $S_p = 0,4 - 0,5$.

Редукционные трансформаторы (РТ) являются эффективным средством защиты от ВВЛ. Первичная I и вторичная II обмотки РТ имеют одинаковое число витков и намотаны на замкнутый железный сердечник. Первичная обмотка включается в разрез металлического покрова кабеля (оболочку, броню) защищаемого кабеля, а вторичная в разрез жил кабеля.

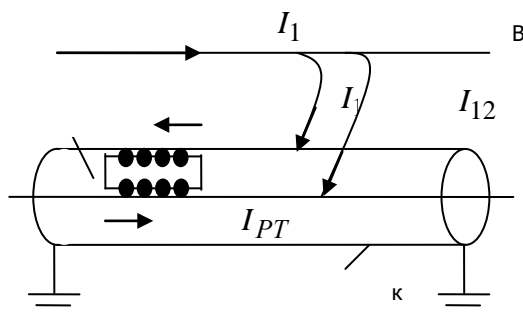
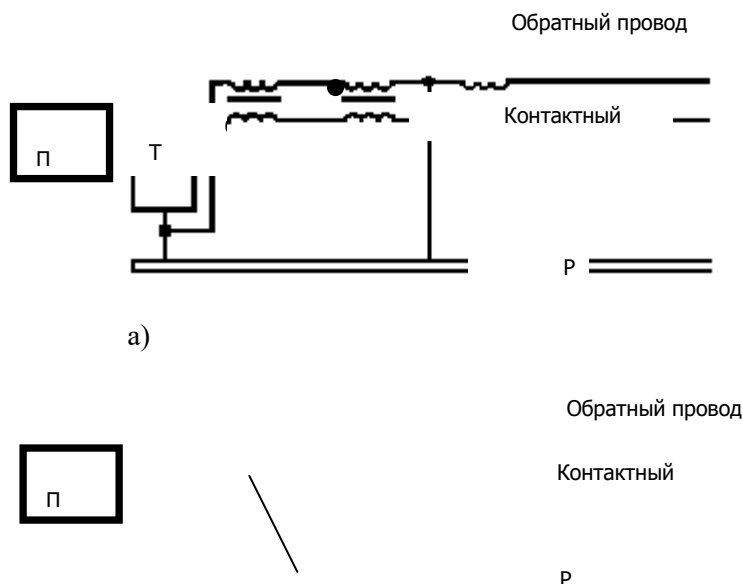


Рисунок 2.11 – Принцип действия редукционного трансформатора

Первичная обмотка РТ обычно выполняется из медного изолированного провода, поперечное сечение которого равно общему эквивалентному поперечному сечению металлического покрова кабеля. Вторичная обмотка представляет пучок изолированных жил кабеля по конструкции одинаковых с жилами защищаемого кабеля. Принцип действия РТ представлен на рис 2.11. Коэффициент экранирования одного РТ $S_{РТ} = 0,3$.

Отсасывающие трансформаторы и сглаживающие устройства.

Отсасывающие трансформаторы используются для уменьшения магнитного влияния контактной сети эл.ж.д. переменного тока. Принцип действия отсасывающего трансформатора ясен из рисунка 2.12.





б)

Рисунок 2.12 – Схема включения отсасывающего трансформатора: а) с обратным проводом; б) без обратного провода

Первичная обмотка трансформатора включается последовательно в контактный провод, вторичная – либо в рельсы, либо в отдельный обратный провод, подвешиваемый на опорах контактной сети. Ток контактной сети, протекая по первичной обмотке, индуцирует во вторичной обмотке противоположно направленный ток. Ток, возникающий в обратном проводе индуцирует в кабеле ток, направление которого противоположно направлению тока, наведённого в кабеле током контактного провода, таким образом суммарный ток, наведённый в кабеле незначительный.

Для сглаживания пульсаций постоянного тока линий эл.ж.д. используются реакторы с резонансными контурами (рис. 2.13)

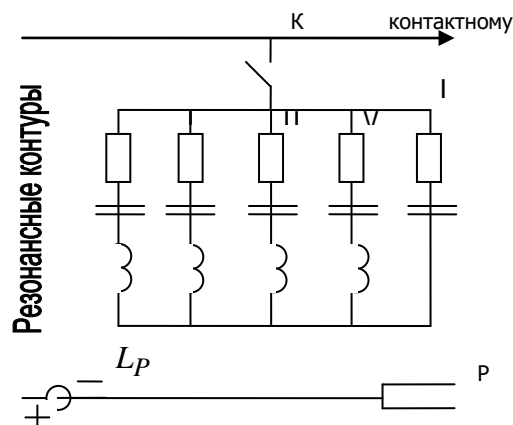


Рисунок 2.13 – Схема сглаживающих устройств

Резонансные контуры настраиваются в резонанс на соответствующие гармоники пульсирующего тока и замыкают накоротко цепи этих гармоник.

Заземление кабелей связи

Заземление - это устройство, состоящее из заземлителей и проводников, соединяющих заземлители с электрическими установками. Заземлитель – это проводник или группа проводников, выполненных из проводящего материала и находящегося в непосредственном соприкосновении с грунтом. Заземлители выполняются в виде трубы, стержня, полосы, листа и др.

В зависимости от выполняемых заземлениями функций различают рабочее, защитное и линейно – защитное заземления.

Рабочим заземлением называется устройство, предназначенное для соединения аппаратуры с землёй, служащее одним из проводников электрической цепи.

Защитное заземление предназначено для соединения с землёй устройств защиты (молниевыводов, разрядников), а также металлических частей оборудования.

Линейно – защитное заземление – это устройства для заземления металлических оболочек и экранов кабелей.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Охарактеризуйте источник внешних колебаний на ЛС.
2. Охарактеризуйте внешние влияния на ЛС.
3. Какие влияния называются мешающими, опасными? Приведите нормы этих влияний.
4. Объясните влияние атмосферного электричества на различные линии связи.
5. Какие повреждения кабеля вызывает атмосферное электричество?
6. Как влияют на линии связи радиостанции, какими факторами определяется интенсивность этого влияния?
7. Приведите классификацию линий электропередачи, охарактеризуйте режимы их работы.
8. Как влияют линии электропередачи на различные линии связи?
9. Объясните сущность опасного магнитного влияния.
10. Какими факторами определяется величина опасного магнитного влияния?
11. Объясните методику расчёта продольной ЭДС и её смысл.
12. Какие меры защиты применяются для защиты ЛС от опасного влияния высоковольтных линий?
13. Объясните принцип действия редуцирующего трансформатора.
14. Объясните принцип действия отсасывающего трансформатора.
15. Объясните принцип действия сглаживающих устройств.
16. Какие заземления используются на линиях связи, какое их назначение?

Письменные задания

1. Приведите схему прокладки грозозащитного троса, если кабель проходит вблизи одиночного дерева.
2. Приведите схему каскадной защиты. Объясните, на каких линиях она применяется.
3. Определите необходимый коэффициент экранирования, если продольная ЭДС $E_z = 3000$ В при дистанционном питании кабеля $U_{он} = 3600$ В.
4. Напряжение в линии электропередачи $U_{ЛЭП} = 20$ кВ, суммарная нагрузка в линии $R_n = 10^4$ Ом. Какое влияние оказывает эта линия?
5. Рассчитать продольную ЭДС для участка сближения (рис. ВЛ.9), если $a_1 = 100$ м; $a_2 = 150$ м; $a_3 = 200$ м; $a_4 = 100$ м; $l_1 = 5$ км; $l_2 = 3$ км; $l_3 = 3$ км; $I = 1000$ А; $\rho_{zp} = 100$ Ом м.
6. Линии связи пересекают эл.ж.д под углами 30° и 80° . Привести схему пересечения, объяснить, в каком случае влияние будет меньшим и почему.
7. Определить горизонтальную составляющую электрического поля, если его вертикальная составляющая $E_v = 2$ мВ/м, частота сигнала радиопередатчика $f = 10$ МГц, проводимость грунта $\sigma_{zp} = 30$ Ом м.

8. Определить разность потенциалов, которая наводится на вертикальном вводе кабеля в здании станции, если длина ввода $l=3$ м, а $E_{\epsilon}=1$ мВ/м. Какое влияние возникнет: опасное или мешающее?

Контрольные вопросы к практическому занятию представлены [1] с. 352 и с.410-411.

Литература

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи. В 2 т. Том 1. Теория передачи и влияния: Учебник для вузов / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов и др. - 7-е изд., перераб. и доп. - Москва : Гор. линия-Телеком, 2011. —424 с.; . ISBN 978-5-9912-0092-9, 1000 экз. – Текст : электронный. – URL: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=256974>
2. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. : Учебное пособие для вузов.-М. Горячая линия -Телеком 2009 г.-268с.;ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

ЦЕЛЬ занятия: выработать умения и навыки расчета параметров и элементов конструкций направляющих сред связи – оптических кабелей связи.

Рекомендации: изучить: [1] Главу 1 с.2-21, Гл.2 с.27 – 52;

[2] Главу 3 с.44-85, Гл.7 с.212 – 265.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Нагрузка на растяжение

Краткие сведения из теории

При механическом расчете оптического кабеля его элементы рассматриваются как система независимо деформирующихся цилиндров, при этом поперечным взаимодействием при растяжении вдоль оси кабеля пренебрегают. Допустимое растяжение F , Н, конструкции кабеля, который состоит из n элементов, рассчитывается по формуле:

$$F = \delta \sum_{i=1}^n k_i E_i S_i, \quad (3.1)$$

где δ – коэффициент допустимого продольного растяжения конструкции кабеля, $\delta=0,01 \dots 0,025$;

k_i – коэффициент, учитывающий расположение i -го элемента относительно оси конструкции кабеля:

$k_i=0$ для элементов, не испытывающих напряжение (оптическое волокно);

$k_i=\cos\psi_i$ для элементов, испытывающих напряжение и расположенных по спирали с углом подъема ψ_i (обычно $30 \dots 35^\circ$) – оболочка оптического модуля;

$k_i=1$ для элементов, испытывающих напряжение и расположенных параллельно оси кабеля (все остальные элементы);

E_i – модуль продольной упругости материала i -го элемента конструкции, Па;

S_i – поперечное сечение i -го элемента конструкции, м^2 .

Если оптический кабель содержит только один силовой элемент – центральный, его сечение для нагрузки на растяжение F может быть рассчитано по формуле

$$S = \frac{1}{E_{\text{цс}}} \left(\frac{F}{\delta} - \sum_{i=1}^{n-1} k_i E_i S_i \right). \quad (3.2)$$

Решение типовых задач

1 Насколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-5-8, если при его изготовлении заменили материал центрального упрочняющего материала с нитей СВМ на кевлар? Рассчитать допустимое растяжение кабеля в обоих случаях.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,5 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,5 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

Кабель содержит 8 оптических модулей. Так как кабель второй разработки, диаметр его оптического модуля составляет 2,5 мм.

Элементы конструкции, к которым прикладывается нагрузка:

- силового элемента;
- оболочки силового элемента;
- трубки оптического модуля;
- внешней оболочки кабеля.

Силовой элемент без оболочки:

- диаметр: $d_{\text{св}} = 3,7 - 2 \cdot 0,5 = 2,7 \text{ мм}$;

- площадь: $S_{\text{св}} = \pi r^2 = 3,14 \cdot (0,5 \cdot 2,7)^2 = 3,14 \cdot 1,35^2 = 5,72 \text{ мм}^2 = 5,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;

- допустимое растяжение элемента из нитей СВМ: $F_{свм} = 0,01 \cdot 1 \cdot 6500 \cdot 10^7 \cdot 5,72 \cdot 10^{-6} = 3718 \text{ Н}$;

- допустимое растяжение элемента из кевлара: $F_{кевлар} = 0,01 \cdot 1 \cdot 12500 \cdot 10^7 \cdot 5,72 \cdot 10^{-6} = 7150 \text{ Н}$.

Оболочка силового элемента:

- площадь: $S_{осэ} = (\pi r_{внеш}^2 - \pi r_{внутр}^2) = 0,25 \cdot \pi \cdot (d_{внеш}^2 - d_{внутр}^2) = 0,25 \cdot 3,14 \times$
 $\times (3,7^2 - 2,7^2) = 5,02 \text{ мм}^2 = 5,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;

- допустимое растяжение поливинилхлоридной оболочки:

$$F_{пвх} = 0,01 \cdot 1 \cdot 300 \cdot 10^7 \cdot 5,02 \cdot 10^{-6} = 150,6 \text{ Н} ;$$

Оболочка одного оптического модуля:

- диаметр модуля без оболочки: $d_m = 2,5 - 2 \cdot 0,5 = 1,5 \text{ мм}$

- площадь: $S_{ом} = 0,25 \cdot \pi \cdot (d_{внеш}^2 - d_{внутр}^2) = 0,25 \cdot 3,14 \cdot (2,5^2 - 1,5^2) =$
 $= 3,14 \text{ мм}^2 = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;

- допустимое растяжение фторопластовой оболочки одного модуля:

$$F_{фл} = 0,01 \cdot \cos 35^\circ \cdot 225 \cdot 10^7 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} = 56,5 \text{ Н} .$$

Оболочка кабеля:

- диаметр кабеля без оболочки: $d_k = 13 - 2 \cdot 1,5 = 10 \text{ мм}$;

- площадь: $S_{ок} = 0,25 \cdot \pi \cdot (d_{внеш}^2 - d_{внутр}^2) = 0,25 \cdot 3,14 \cdot (13^2 - 10^2) =$
 $= 54,16 \text{ мм}^2 = 54,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;

- допустимое растяжение полиэтиленовой оболочки:

$$F_{пэ} = 0,01 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 10^7 \cdot 54,16 \cdot 10^{-6} = 81,2 \text{ Н} .$$

Разница в допустимом растяжении кабеля при смене материала силового элемента будет определяться соотношением:

$$F_{кевлар} - F_{свм} = 7150 - 3718 = 3432 \text{ Н} .$$

Допустимое растяжение кабеля с силовым элементом из нитей СВМ:
 $F = 3718 + 150,6 + 8 \cdot 56,5 + 81,2 = 4401,8 \text{ Н}$

Допустимое растяжение кабеля с кевларовым силовым элементом:
 $F = 7150 + 150,6 + 8 \cdot 56,5 + 81,2 = 7833,8 \text{ Н}$

2 Насколько изменится радиус сердцевины центрального упрочняющего элемента, изготовленной из нитей СВМ, кабеля ОК-50-2-3-8, если требуется получить конструкцию с минимально допустимым для линейных кабелей растягивающим усилием.

При расчете использовать конструктивные размеры из задачи 1.

Геометрические размеры кабелей ОК-50-2-3-8 и ОК-50-2-5-8 одинаковы, воспользуемся результатами предыдущей задачи.

Минимально допустимое растягивающее усилие для линейных кабелей типа ОК-50 1200 Н

Значение площади сечения сердцевины конструкции с минимально допустимым для линейных кабелей растягивающим усилием:

$$S_{арм} = \frac{1}{E_{арм}} \left(\frac{F}{\delta} - \sum_{i=1}^{n-1} k_i E_i S_i \right) = \frac{1}{6500 \cdot 10^7} \left(\frac{1200}{0,01} - \frac{150,6 + 8 \cdot 56,5 + 81,2}{0,01} \right) =$$

$$= \frac{1}{65000} (120000 - 68380) \cdot 10^{-6} = 0,79 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,79 \text{ мм}^2 .$$

Новый радиус сердцевины:

$$r = \sqrt{\frac{S_{арм}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,79}{3,14}} = 0,50 \text{ мм}$$

Старый радиус сердцевины (по задаче 1):

$$r = \frac{d}{2} = \frac{2,7}{2} = 1,35 \text{ мм}$$

Разница радиусов сердцевины: $\Delta r = 0,5 - 1,35 = -0,85 \text{ мм}$.

Т.о. радиус сердцевины уменьшится на 0,85 мм.

Задачи для самостоятельного решения

1 Насколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8, если при его изготовлении внешний диаметр оболочки изменялся в пределах нормы? Рассчитать допустимое растяжение кабеля в обоих случаях.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,4 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,55 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,6 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

2 Какой объем гидрофобного заполнителя потребуется для заполнения свободного внутреннего пространства 1 км кабеля ОК-50-2-5-8?

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,5 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм.

3 Насколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8, если при изготовлении кабеля заменили материал центрального упрочняющего элемента с нитей СВМ на сталь? Рассчитать допустимое растяжение кабеля в обоих случаях.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,6 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,55 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,45 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,8 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,02$.

4 Сравнить допустимую нагрузку на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8 и ОК-50-2-3-4.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,5 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,5 мм;
- толщина поливинилхлоридной трубки корделя заполнения 0,5 мм;
- кордели заполнения выполнены из стеклопластика;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,7 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,02$.

5 Проверить, будет ли выдерживать кабель ОКСНМ-10-01-0,22-24 (6,0) требуемую нагрузку на растяжение, при толщине слоя арамидных нитей 0,2 мм? А при толщине 0,25 мм?

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,5 мм;
- наружный диаметр оптического модуля 3,0 мм;
- толщина трубки оптического модуля из полибутилентерефталата 0,5 мм;
- толщина внутренней полиэтиленовой оболочки 0,4 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 2 мм;
- наружный диаметр кабеля 14 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

6 Рассчитать минимальную толщину слоя арамидных нитей для кабеля ОКСНМ-10-01-0,22-24 (6,0) со следующими параметрами:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,5 мм;
- наружный диаметр оптического модуля 2,4 мм;
- толщина трубки оптического модуля из полибутилентерефталата 0,4 мм;

- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 2 мм;
 - наружный диаметр кабеля 14,8 мм;
 - коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.
- При расчетах пренебречь вкладом внутренней полиэтиленовой оболочки.

7 Рассчитать и сравнить допустимую нагрузку на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-4 и ОК-50-3-3-4.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,5 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,55 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,45 мм;
- толщина поливинилхлоридной трубки корделя заполнения 0,5 мм;
- кордели заполнения выполнены из стеклопластика;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,02$.

Основные параметры

Краткие сведения из теории

К основным параметрам оптических кабелей относят следующие значения:

- относительное значение показателя преломления:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (3.3)$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины оптоволокна;

n_2 – показатель преломления оболочки оптоволокна;

- числовая апертура

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3.4)$$

где θ – максимальный угол ввода луча в волокно, при котором луч удерживается сердцевиной;

- нормированная частота

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}; \quad (3.5)$$

- число мод:

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 \text{ в ступенчатом волокне}; \quad (3.6)$$

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 \text{ в градиентном волокне}; \quad (3.7)$$

- длина волны отсечки

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2,61a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}; \quad (3.8)$$

- критическая длина волны моды

$$\lambda_o = \frac{\pi d}{P_{nm} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ мкм} \quad (3.9)$$

где d – диаметр сердцевины оптического волокна;

P_{nm} – значения корней функций Бесселя для различных типов волн;

n_1 – показатель преломления сердцевины;

n_2 – показатель преломления оболочки;

- критическая частота моды

$$f_o = \frac{P_{nm} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \text{ Гц.} \quad (3.10)$$

Решение типовых задач

1 Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне кабеля типа ОКК-50-01-4 при $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$. Насколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевины оптоволокна в пределах нормы?

В кабеле используется градиентное оптоволокно с диаметром сердцевины 50 ± 3 мкм. Кабель используется на длине волны 1,3 мкм.

Для нахождения числа мод, распространяющихся в оптоволокне, необходимо знать показатель преломления середины волокна n_1 . Из формулы для нахождения относительного значения показателя преломления имеем:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \Rightarrow 2\Delta n_1^2 = n_1^2 - n_2^2 \Rightarrow n_1^2(1 - 2\Delta) = n_2^2 \Rightarrow n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1 - 2\Delta}}.$$

$$n_1 = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Число мод при диаметре сердцевины 50 мкм:

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} \right)^2 = 165.$$

Если диаметр сердцевины изменяется в пределах нормы, то минимальный диаметр равен 47 мкм, максимальный 53 мкм. Тогда число мод:

$$N_{47} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 47 / 2}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} \right)^2 = 145.$$

$$N_{53} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 53 / 2}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} \right)^2 = 185.$$

Т.о. при изменении диаметра сердцевины оптического волокна в пределах нормы число распространяющихся мод меняется на 40.

2 Определить, во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКК-10-01 при $n_1 = 1,510$, $\Delta = 0,01$.

Для нахождения нормированной частоты необходимо знать еще показатель преломления оболочки оптического волокна. Найдем ее из формулы для нахождения относительного значения показателя преломления:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \Rightarrow n_1^2(1 - 2\Delta) = n_2^2 \Rightarrow n_2 = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)}.$$

Показатель преломления оболочки оптического волокна:

$$n_2 = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = 1,51 \sqrt{(1 - 2 \cdot 0,01)} = 1,495.$$

Нормированная частота в кабеле типа ОК-50-01:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2}{1,3} \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = 25,64.$$

Нормированная частота в кабеле типа ОКК-10-01:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10 / 2}{1,3} \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = 5,13.$$

Соотношение частот:

$$\frac{25,64}{5,13} \approx 5.$$

3 Определить, насколько отличается величина числовой апертуры в оптоволокне кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптоволокне кабеля типа ОМЗКГ-10-1. В обоих типах оптических волокон $\Delta = 0,01$; для ОВ в кабеле ОКК-50-01 $n_1 = 1,505$, для ОВ в кабеле ОМЗКГ-10-1 $n_1 = 1,510$.

Для определения числовой апертуры необходимо знать еще показатель преломления оболочки оптического волокна.

ОКК-50-01:

$$n_2 = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = 1,505 \sqrt{(1 - 2 \cdot 0,01)} = 1,49$$

ОМЗКГ-10-1:

$$n_2 = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = 1,51 \sqrt{(1 - 2 \cdot 0,01)} = 1,495$$

Тогда числовая апертура

ОКК-50-01:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} = 0,212.$$

ОМЗКГ-10-1:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = 0,2123.$$

Разница числовых апертур составляет 0,0003.

4 Насколько изменится критическая частота в оптических волокнах кабеля типа ОКЛ-01 при изменении параметров сердцевины в пределах нормы? Рассчитать значение критической частоты для стандартного диаметра сердцевины оптического волокна. Значения параметров ОВ: $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$. Тип волны HE.

Для нахождения критической частоты необходимо найти значение n_1 :

$$n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1-2\Delta}} = \sqrt{\frac{1,49^2}{1-2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Оптическое волокно одномодовое. Первая мода волны HE является основной и существует всегда. Вторая мода образуется при значении $P_{nm} = 3,832$.

Если диаметр сердцевины оптоволокна принять равным 8,5 мкм:

$$f_0 = \frac{P_{nm}c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 300000000}{3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2}} = 2,03 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

Если диаметр сердцевины оптоволокна 7,5 мкм:

$$f_0 = \frac{P_{nm}c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 300000000}{3,14 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2}} = 2,30 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

Если диаметр сердцевины оптоволокна 9,5 мкм:

$$f_0 = \frac{P_{nm}c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 300000000}{3,14 \cdot 9,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2}} = 1,82 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

При изменении диаметра сердцевины в пределах нормы критическая частота уменьшится 48 ТГц.

5 Насколько изменится критическая длина волны в оптических волокнах кабеля типа ОКЛ-01, если изменить передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается HE_{21} ? Значения параметров ОВ: $n_1=1,504$, $\Delta=0,01$.

Для нахождения критической длины волны знать еще показатель преломления оболочки оптического волокна.

$$n_2 = n_1 \sqrt{(1-2\Delta)} = 1,504 \sqrt{(1-2 \cdot 0,01)} = 1,489.$$

Для волны E_{01}

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 8,5}{2,405 \cdot 1,504} \sqrt{1,504^2 - 1,489^2} = 1,56 \text{ мкм}.$$

Для волны HE_{21}

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 8,5}{2,443 \cdot 1,504} \sqrt{1,504^2 - 1,489^2} = 1,54 \text{ мкм}.$$

Критическая длина волны уменьшится на 0,02 мкм.

Задачи для самостоятельного решения

1 Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне кабеля типа ОК-50-2-5-4 при $n_2=1,5$, $\Delta=0,012$. Насколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевины оптоволокна в пределах нормы?

2 Определить, во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКЛБ-01-0,3 при $n_1=1,51$, $\Delta=0,011$.

3 Определить, насколько отличается величина числовой апертуры в оптоволокне кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптоволокне кабеля типа ОКЛБ-01-0,3. В обоих типах оптических волокон $\Delta=0,011$; для ОВ в кабеле ОКК-50-01 $n_1=1,503$, для ОВ в кабеле ОКЛБ-01-0,3 $n_1=1,508$.

4 Насколько изменится критическая частота в оптических волокнах кабеля типа ОКЛС-01 при изменении параметров сердцевины в пределах нормы? Рассчитать значение критической частоты для стандартного диаметра сердцевины оптического волокна. Значения параметров ОВ: $n_2=1,480$, $\Delta=0,01$. Тип волны HE_{21} .

5 Насколько изменятся критическая частота и критическая длина волны в оптических волокнах кабеля типа ОКЛ-01, если изменится передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается E_{H11} ? Значения параметров ОВ: $n_1=1,5$, $\Delta=0,011$.

Литература

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи. В 2 т. Том 1. Теория передачи и влияния: Учебник для вузов / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов и др. - 7-е изд., перераб. и доп. - Москва : Гор. линия-Телеком, 2011. –424 с.; . ISBN 978-5-9912-0092-9, 1000 экз. – Текст : электронный. – URL: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=256974>
2. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. : Учебное пособие для вузов.-М. Горячая линия -Телеком 2009 г.-268с.;ил.
- 3.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИИ В ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЯХ

ЦЕЛЬ занятия: выработать умения и навыки расчета дисперсии в оптических кабелях.

Рекомендации: изучить: [1] Гл.2 с.31 – 45;

[2] Гл.7 с.212 – 265.

Краткие сведения из теории

Дисперсия в оптическом волокне определяет уширение импульсов при прохождении некоторого участка пути.

В общем случае дисперсия состоит из

- межмодовой дисперсии, имеющей место только в многомодовом волокне;
- хроматической дисперсии, наблюдающейся как в многомодовом, так и в одномодовом волокне.

Расчетные формулы для межмодовой дисперсии зависят от профиля показателя преломления и длины расчетного участка L . Для ступенчатого профиля показателя преломления применяется формула

$$\tau_{\text{мод ст}}(L) = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, & L \leq L_c \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{LL_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad (4.1)$$

а для градиентного (параболического) –

$$\tau_{\text{мод гр}}(L) = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, & L \leq L_c \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{LL_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad (4.2)$$

где L_c – длина связи мод, равная 5-7 км для ступенчатого многомодового волокна и 10-15 км для градиентных волокон.

Хроматическая дисперсия состоит из

- материальной дисперсии

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \quad (4.3)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника (1-3 нм для лазера и 20-40 нм для светоизлучающих диодов);

$M(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия;

- волноводной дисперсии

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda), \quad (4.4)$$

где $B(\lambda)$ – удельная волноводная дисперсия;

профильной дисперсии, характерной для реального оптического кабеля

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot P(\lambda), \quad (4.5)$$

где $P(\lambda)$ – удельная профильная дисперсия.

Хроматическая дисперсия рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{хром}} = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{пр}}. \quad (4.6)$$

Общая дисперсия – в общем случае по формуле

$$\tau^2 = \tau_{\text{мод}}^2 + \tau_{\text{хром}}^2, \quad (4.7)$$

однако с учетом величин вкладов составляющих дисперсий имеем

- для одномодового волокна

$$\tau = \tau_{\text{хром}}; \quad (4.8)$$

- для многомодового волокна

$$\tau = \tau_{\text{мод}}. \quad (4.9)$$

Решение типовых задач

1 На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей – с градиентными и ступенчатыми многомодовыми оптическими волокнами. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 9 км; $n_2=1,490$, $\Delta n=0,015$.

Коэффициент преломления сердечника оптического волокна

$$n_1 = n_2 + \Delta n = 1,490 + 0,015 = 1,505.$$

Относительное значение показателя преломления:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{1,505^2 - 1,49^2}{2 \cdot 1,505^2} = 0,01.$$

В оптических кабелях с многомодовыми волокнами наибольший вклад в уширение импульсов вносит модовая дисперсия.

Межмодовая дисперсия:

- ступенчатый профиль: $L_c = 5-7$ км $\Rightarrow L > L_c$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{LL_c} = \frac{1,505 \cdot 0,01}{300000} \sqrt{9 \cdot 5} = 0,337 \text{ нс}.$$

- градиентный профиль: $L_c = 10-15$ км $\Rightarrow L < L_c$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L = \frac{1,505 \cdot 0,01^2}{2 \cdot 300000} \cdot 9 = 2,258 \text{ нс}.$$

Отношение дисперсий:

$$\frac{0,337 \cdot 10^{-6}}{2,258 \cdot 10^{-9}} = 149,1.$$

Уширение импульсов в кабеле со ступенчатыми многомодовыми оптическими волокнами будет в 149,1 раз больше, чем в кабеле с градиентными волокнами.

2 Во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОКЛ-01, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный с длиной волны 0,85 мкм. Длина ВОЛС 63 км.

ОКЛ-01 – кабель с одномодовыми волокнами. Для определения дисперсии необходимо рассчитать хроматическую дисперсию (материальная, волноводная, профильная). Кабель предназначен для работы на длине волны 1,55 мкм.

Материальная дисперсия:

- лазерный ИИ:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot (-18) = -1134 \text{ пс} = -1,134 \text{ нс};$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 125 = 157500 \text{ пс} = 157,5 \text{ нс}.$$

Волноводная дисперсия

- лазерный ИИ:

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot 12 = 756 \text{ пс} = 0,756 \text{ нс};$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 5 = 6300 \text{ пс} = 6,3 \text{ нс}.$$

Профильная дисперсия

- лазерный ИИ:

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot P(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot 5 = 315 \text{ пс} = 0,315 \text{ нс};$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot P(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 0 = 0 \text{ нс}.$$

Хроматическая дисперсия:

- лазерный ИИ:

$$\tau_{\text{хр}} = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{пр}} = -1,134 + 0,756 + 0,315 = -0,063 \text{ нс};$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{\text{хр}} = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{пр}} = 157,5 + 6,3 + 0 = 163,8 \text{ нс}.$$

Отношение дисперсий:

$$\frac{163,8}{-0,063} = -2600.$$

Дисперсия при использовании светодиодного источника излучения будет в 2600 раз больше.

Задачи для самостоятельного решения

1 На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей – с градиентными и ступенчатыми многомодовыми оптическими волокнами. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 11 км; $n_2 = 1,492$, $\Delta n = 0,01$.

2 Во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОМЗКГ, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный с длиной волны 0,87 мкм. Длина ВОЛС 48 км.

Литература

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи. В 2 т. Том 1. Теория передачи и влияния: Учебник для вузов / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов и др. - 7-е изд., перераб. и доп. - Москва : Гор. линия-Телеком, 2011. —424 с.; . ISBN 978-5-9912-0092-9, 1000 экз. – Текст : электронный. – URL: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=256974>
2. Ксенофонов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. : Учебное пособие для вузов.-М. Горячая линия -Телеком 2009 г.-268с.;ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА

ЦЕЛЬ занятия: выработать умения и навыки расчета длины регенерационного участка.

Рекомендации: изучить: [1] Гл.9 с.346;

Ограничение длины регенерационного участка затуханием

Краткие сведения из теории

Затухание в оптическом кабеле состоит из собственных и кабельных потерь. Собственные потери состоят из

- потерь на рассеяние

$$\alpha_p = \frac{K}{(\lambda[\text{мкм}])^4}, \quad (5.1)$$

где K – коэффициент рассеяния, для кварца равный $0,8 (\text{мкм}^4 \cdot \text{дБ})/\text{км}$;

- потерь на поглощение

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda[\text{км}]}, \quad (5.2)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала сердцевинны оптического волокна.

Вследствие сложной структуры потерь на поглощение, оптические кабели используют в «окнах прозрачности» – на определенных длинах волн, где данный вид потерь минимален. Исторически используются три окна прозрачности: $0,85 \text{ мкм}$, $1,3 \text{ мкм}$ и $1,55 \text{ мкм}$.

При распространении электромагнитной волны с длиной волны порядка 2 мкм и более начинают интенсивно расти потери на поглощение. Это обусловлено иным механизмом потерь кварцевых волоконных световодов инфракрасной области спектра. В этом случае потери на поглощение рассчитываются как

$$\alpha = C e^{-k/\lambda[\text{м}]}, \quad (5.4)$$

где C и k – постоянные коэффициенты (для кварца $k=(0,7 \dots 0,9) \cdot 10^{-6}$, $C=0,9$).

Кабельные потери складываются из множества составляющих, например, из потерь на микроизгибах:

$$\alpha_{\text{микро}} = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 b^6} \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{3/2}, \quad (5.5)$$

где $k_3=0,9 \dots 10$;

N_n – число неоднородностей в виде выпуклостей со средней высотой y_n на единицу длины;

a – радиус сердцевинны;

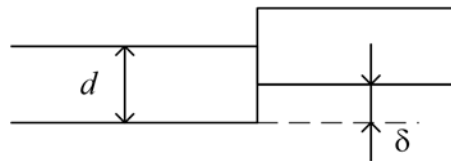
b – диаметр оптической оболочки;

Δ – относительное значение показателя преломления;

E_o и E_c – модули Юнга оболочки и сердцевинны соответственно.

На участке сростки оптических волокон затухание может достигать величин больших, чем в самом оптическом кабеле. Возможные варианты дефектов сопряжения оптических волокон:

- *радиальное смещение*

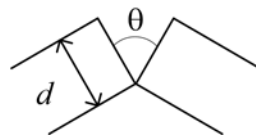


$$A_\delta = 10 \lg \frac{d}{d - \delta}, \text{ дБ}, \quad (5.6)$$

где d – диаметр сердцевинны оптоволокна;

δ – радиальное смещение;

- *угловое смещение*

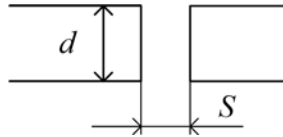


$$A_\theta = 10 \lg \frac{\theta_A}{\theta_A - \theta}, \text{ дБ}, \quad (5.7)$$

где θ_A – апертурный угол волокна;

θ – угловое смещение;

- осевое смещение



$$A_s = 10 \lg \frac{2d}{2d - S \operatorname{tg} \theta_A}, \text{ дБ}, \quad (5.8)$$

где S - осевое смещение.

Решение типовых задач

1 Насколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а в первом окне прозрачности. Параметры оптического волокна $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$, $\operatorname{tg} \delta=10^{-11}$.

Коэффициент преломления сердечника оптического волокна

$$n_1 = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Третье окно прозрачности соответствует длине волны 1550 нм (или 1,55 мкм), первое – 850 нм (0,85 мкм).

Собственные потери в оптическом волокне складываются из потерь на поглощение (материалом и на примеси) и потерь на рассеяние.

Третье окно прозрачности:

- общие потери на поглощение:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,505 \cdot 10^{-11}}{1,55 \cdot 10^{-6}} = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км};$$

- потери на рассеяние:

$$\alpha_p = \frac{K}{(\lambda[\text{мкм}])^4} = \frac{0,8}{1,55^4} = 0,14 \text{ дБ/км};$$

- собственные потери:

$$\alpha_c = 0,26 \cdot 10^{-3} + 0,14 = 0,14 \text{ дБ/км}.$$

Первое окно прозрачности:

- общие потери на поглощение:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,505 \cdot 10^{-11}}{0,85 \cdot 10^{-3}} = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км};$$

- потери на рассеяние:

$$\alpha_p = \frac{K}{(\lambda[\text{мкм}])^4} = \frac{0,8}{0,85^4} = 1,53 \text{ дБ/км};$$

- собственные потери:

$$\alpha_c = 0,48 \cdot 10^{-3} + 1,53 = 1,53 \text{ дБ/км}.$$

Т.о. при переносе передачи с третьего в первое окно прозрачности собственные потери увеличатся на 1,39 дБ/км.

2 Какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом оптоволокне, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 2, 2,5 и 3 мкм?

Дополнительные потери на 2 мкм:

$$\alpha = C e^{-k/\lambda} = 0,9 \exp\left(-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}}\right) = 0,603 \text{ дБ/км}.$$

Дополнительные потери на 2,5 мкм:

$$\alpha = C e^{-k/\lambda} = 0,9 \exp\left(-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-6}}\right) = 0,645 \text{ дБ/км}.$$

Дополнительные потери на 3 мкм:

$$\alpha = C e^{-k/\lambda} = 0,9 \exp\left(-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}}\right) = 0,689 \text{ дБ/км}.$$

3 Какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если при изготовлении кабеля ОКК-50-01-4 возникли дополнительные микроизгибы. Параметры оптического волокна и микроизгибов: $\Delta=0,0053$, $N_n=100$, $y_n=0,0025$ мм, $E_o=6,9 \cdot 10^8$ Н/м², $E_c=6,2 \cdot 10^{10}$ Н/м².

Оптическое волокно кабеля ОКК-50-01-4 имеет диаметр отражающей оболочки 125 мкм, диаметр сердцевинки 50 мкм.

$$\alpha_{\text{микро}} = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 b^6} \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{3/2} = 0,9 \cdot 100 \cdot 2,5^2 \cdot \frac{(50/2)^4}{0,0053^3 \cdot 125^6} \times \left(\frac{6,9 \cdot 10^8}{6,2 \cdot 10^{10}} \right)^{3/2} = 0,45 \text{ дБ / км}.$$

4 При сращивании строительных длин оптического кабеля ОКК-10-01 в одном из волокон произошло радиальное смещение торцов на 1 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери.

Диаметр сердцевинки оптоволокна кабеля ОКК-10-01 составляет 10 мкм.

Тогда дополнительные потери составят:

$$A_\delta = 10 \lg \frac{d}{d - \delta} = 10 \lg \frac{10}{9} = 0,46 \text{ дБ}.$$

5 При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу с линейным оптическим кабелем ОКК-50-01 произошло угловое смещение торцов волокна на 3°. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры ОВ: $n_1=1,505$, $\Delta=0,01$.

Для нахождения дополнительных потерь в этом случае необходимо знать значение апертурного угла.

Рассчитаем показатель преломления оболочки оптического волокна

$$n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = 1,505 \sqrt{1 - 2 \cdot 0,01} = 1,49.$$

Числовая апертура:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} = 0,212, \text{ откуда апертурный угол}$$

$$\theta = \arcsin(NA) = \arcsin(0,212) = 0,214 \text{ рад} = 12,3^\circ.$$

Дополнительные потери

$$A_\theta = 10 \lg \frac{\theta_A}{\theta_A - \theta} = 10 \lg \frac{12,3}{12,3 - 3} = 1,21 \text{ дБ}.$$

6 С течением времени в разъёмном соединителе станционного оптического кабеля ОКК-50-01 произошло осевое смещение торцов оптического волокна на 25 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна $n_2=1,49$, $\Delta=0,01$.

Диаметр сердцевинки оптоволокна данного кабеля составляет 50 мкм.

Необходимо найти значение апертурного угла.

$$n_1 = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505$$

Параметры совпадают с предыдущей задачей, следовательно, апертурный угол равен 12,3°.

Дополнительные потери

$$A_\theta = 10 \lg \frac{2d}{2d - S \operatorname{tg} \theta_A} = 10 \lg \frac{2 \cdot 50}{2 \cdot 50 - 25 \cdot \operatorname{tg}(12,3^\circ)} = 0,24, \text{ дБ}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1 Насколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а во втором окне прозрачности. Параметры оптического волокна $n_2=1,495$, $\Delta=0,011$, $\operatorname{tg} \delta=10^{-11}$.

2 Какое дополнительное затухание следует ожидать в оптических волокнах кабеля типа ОКЛС-01, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 1,8, 2,3 и 2,9 мкм?

3 Какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если при изготовлении кабеля ОК-50-2-3-8 возникли дополнительные микроизгибы. Параметры оптического волокна и микроизгибов: $\Delta=0,005$, $N_n=200$, $y_n=0,0025$ мм, $E_o=6,9 \cdot 10^8$ Н/м², $E_c=6,2 \cdot 10^{10}$ Н/м².

4 При сращивании строительных длин оптического кабеля ОК-50-2-3-8 в одном из волокон произошло радиальное смещение торцов на 5 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери.

5 При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу с линейным оптическим кабелем ОК-50-3-3-8 произошло угловое смещение торцов волокна на 8°. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры ОВ: $n_1=1,5$, $\Delta=0,009$.

6 С течением времени в разъёмном соединителе станционного оптического кабеля ОКС-50-01 произошло осевое смещение торцов оптического волокна на 15 мкм и угловое смещение торцов волокна на 5°. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна $n_2=1,49$, $\Delta=0,009$.

Расчет длины ЭКУ, ограниченной затуханием

В документации на аппаратуру ВОСП приводятся следующие параметры:

$\rho_{\text{нд макс}}$ – максимальный уровень мощности оптического излучения на выходе оптического передатчика;

$\rho_{\text{нд мин}}$ – минимальный уровень мощности оптического излучения на выходе оптического передатчика;

$\rho_{\text{пм макс}}$ (или $\rho_{\text{пмп}}$) – уровень перегрузки оптического приемника – максимально допустимый уровень мощности принимаемого оптического сигнала в точке приема, при которой обеспечивается заданное значение коэффициента ошибки;

$\rho_{\text{пм мин}}$ (или $\rho_{\text{пмч}}$) – уровень чувствительности оптического приемника – минимально допустимый уровень мощности принимаемого оптического сигнала в точке приема, при которой обеспечивается заданное значение коэффициента ошибки;

$A_{\text{эз}}$ – эксплуатационный запас, учитывающий потери энергии при старении аппаратуры и кабеля.

С учетом этих параметров определяются (рис. 6.1.):

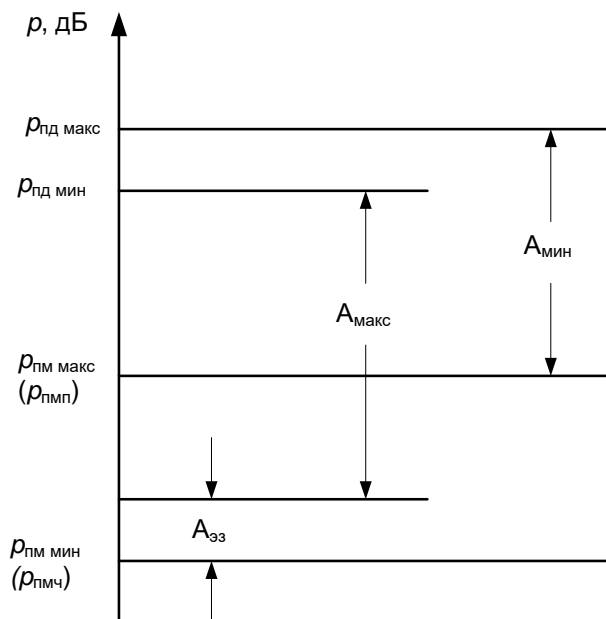


Рис. 5.1 – Диаграмма уровней оптической секции

- максимальное значение перекрываемого затухания

$$A_{\text{макс}} = \rho_{\text{нд мин}} - \rho_{\text{пмч}} - A_{\text{эз}};$$

- минимальное значение перекрываемого затухания

$$A_{\text{мин}} = \rho_{\text{нд макс}} - \rho_{\text{пмп}}$$

Тогда максимально допустимая длина ЭКУ по затуханию

$$L_{\text{макс}} = A_{\text{макс}} / \alpha,$$

где α – коэффициент затухания;

минимально допустимая длина ЭКУ по затуханию

$$L_{\text{мин}} = A_{\text{мин}} / \alpha$$

Очевидно, что длина L проектируемого ЭКУ должна удовлетворять соотношению $L_{\min} < L < L_{\max}$.

В приведенной методике расчета не учитываются потери в разъёмных и неразъёмных соединениях ОВ, разброс значений коэффициента затухания, потери за счет дисперсии и др.

В соответствии с [11] при проектировании ВОСП необходимо производить расчет номинальной, минимальной и максимальной длины ЭКУ.

Номинальная длина ЭКУ – такая протяженность ЭКУ, при которой заданная норма на вероятность ошибки при передаче информационных цифровых сигналов выполняется для всех 100% равновеликих ЭКУ, даже если все их строительные длины имеют максимальный коэффициент затухания, а все сварные соединения ОВ – максимально допустимые потери:

$$L_{\text{ном}} = \frac{W - A_{\text{эз}} - A_{\text{д}} - A_{\text{рс}} \cdot n_{\text{рс}} + A_{\text{нсмакс}} - \Delta\alpha}{\alpha_{\text{макс}} + A_{\text{нсмакс}} / l_{\text{сд}}},$$

где W – энергетический потенциал ВОСП, дБ;

$A_{\text{эз}}$ – эксплуатационный запас энергетического потенциала на аппаратуру и кабель, дБ;

$A_{\text{д}}$ – запас энергетического потенциала на дисперсию, дБ, (учитывается на участках предельной длины с использованием оптических усилителей);

$A_{\text{рс}}$ – потери на разъёмном соединении, дБ;

$n_{\text{рс}}$ – число разъёмных соединений, дБ;

$A_{\text{нс макс}}$ – максимальное значение потерь неразъёмного соединения, дБ;

$\alpha_{\text{макс}}$ – максимальное значение коэффициента затухания ОВ, заданное в технических условиях (спецификациях) на строительную длину кабеля, дБ/км;

$l_{\text{сд}}$ – строительная длина ВОК, км;

$\Delta\alpha$ – погрешность измерения затухания сигнала на ЭКУ, дБ.

Минимальная длина ЭКУ – протяженность ЭКУ, при которой уровень оптического сигнала на приеме не превышает заданный для 50% равновеликих ЭКУ.

$$L_{\min} = \frac{W - \Delta A - A_{\text{рс}} + A_{\text{нс ср}}}{\alpha_{\text{ср}} + A_{\text{нс ср}} / l_{\text{ср}}},$$

где $\Delta A = \rho_{\text{нмп}} - \rho_{\text{нмч}}$ – динамический диапазон уровня оптического приемника, дБ;

$A_{\text{нс ср}}$ – среднее значение потерь неразъёмного соединения, дБ;

$\alpha_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента затухания ОВ, дБ/км.

Максимальная длина ЭКУ – такая протяженность ЭКУ, при которой норма на вероятность ошибки при передаче информационных цифровых сигналов выполняется для 99,80 % равновеликих ЭКУ:

$$L_{\max} = \frac{W - A_{\text{эз}} - A_{\text{рс}} \cdot n_{\text{рс}} - A_{\text{д}} - K\sqrt{L_{\text{ном}}} + A_{\text{нс ср}} - \Delta\alpha}{\alpha_{\text{ср}} + K / \sqrt{L_{\text{ном}}} + A_{\text{нс ср}} / l_{\text{ср}}},$$

$$K = 0,346\sqrt{1 + 1/l_{\text{ср}}} / \lambda^4,$$

λ – рабочая длина волны, мкм.

Пример расчета длины ЭКУ, обусловленной затуханием излучения.

Исходные данные:

– энергетический потенциал $W = \rho_{\text{нг max}} - \rho_{\text{нмч}} = 32$ дБ;

- эксплуатационный запас аппаратуры и кабеля $A_{эз} = 6$ дБ;
- потери в разъемном соединении $A_{рс} = 0,5$ дБ;
- количество разъемных соединений $n_{рс} = 2$;
- строительная длина кабеля $L_{сд} = 6$ км;
- погрешности измерения затухания $\Delta\alpha = 3$ дБ;
- максимальные потери в неразъемном соединении $A_{нсmax} = 0,1$ дБ;
- средние потери в неразъемном соединении $A_{нсср} = 0,05$ дБ;
- максимальный коэффициент затухания ОВ $\alpha_{max} = 0,25$ дБ/км;
- среднее значение коэффициента затухания $\alpha_{ср} = 0,2$ дБ/км;
- коэффициент разброса затухания и потерь $\kappa = 0,065$.

Подставляя исходные данные в формулы (5.5...5.7) получим:

$$L_{ном} = \frac{32 - 6 - 0,5 \cdot 2 + 0,1 - 3}{0,25 + 0,1 / 6} = 82,77 \text{ км};$$

$$L_{мин} = \frac{32 - 24 - 0,5 \cdot 2 + 0,05}{0,2 + 0,05 / 6} = 33,57 \text{ км};$$

$$L_{макс} = \frac{32 - 6 - 0,5 \cdot 2 - 0,06\sqrt{82,77} + 0,05}{0,2 + 0,065 / \sqrt{82,77} + 0,05 / 6} = 113,8 \text{ км}.$$

Длину ЭКУ можно увеличить, если применить оптические усилители.

Так, например, для аппаратуры уровня *STM-16* (код применения L - 16,2):

$$\rho_{нд макс} = 3 \text{ дБм}; \quad \rho_{нд мин} = -2 \text{ дБм};$$

$$\rho_{нмч} = -27 \text{ дБм}; \quad \rho_{нмп} = -9 \text{ дБм}.$$

Перекрываемые затухания

$$A_{макс} = \rho_{нд мин} - \rho_{нмч} - A_{эз} = -2 - (-27) - 1 = 24 \text{ дБ};$$

$$A_{мин} = \rho_{нд макс} - \rho_{нмп} = 3 - (-9) = 12 \text{ дБ}.$$

Параметры оптического усилителя мощности

$$\rho_{ум мин} = 10 \text{ дБм}; \quad \rho_{ум макс} = 13 \text{ дБм}.$$

Параметры оптического предусилителя

$$\rho_{пуч} = -34 \text{ дБ}; \quad \rho_{пуп} = -18 \text{ дБ}.$$

При использовании только усилителя мощности на передающей стороне:

$$A_{макс}^{ум} = \rho_{ум мин} - \rho_{нмч} - A_{эз} - \Delta A = 33 \text{ дБ},$$

где $\Delta A \approx 3$ дБ – учет снижения чувствительности за счет дополнительных помех;

$$A_{мин}^{ум} = \rho_{ум макс} - \rho_{нмп} = 18 \text{ дБ}.$$

При использовании только предусилителя на приемной стороне:

$$A_{макс}^{пу} = \rho_{нд мин} - \rho_{пуч} - A_{эз} - \Delta A = 28 \text{ дБ};$$

$$A_{мин}^{пу} = \rho_{нд макс} - \rho_{пуп} = 17 \text{ дБ};$$

При использовании одновременно усилителя мощности и предусилителя:

$$A'_{макс} = \rho_{ум мин} - \rho_{пуч} - A_{эз} - 2 \Delta A = 37 \text{ дБ};$$

$$A'_{мин} = \rho_{ум макс} - \rho_{пуп} = 24 \text{ дБ}.$$

Таким образом, за счет применения оптических усилителей можно существенно увеличить перекрываемое затухание, а, следовательно, и длину ЭКУ.

1.1.1 Расчет длины ЭКУ, ограниченной дисперсией

В соответствии с Рек. G.957 МСЭ-Т ориентировочное значение максимальной длины ЭКУ, ограниченной дисперсией, может быть определено по формуле:

$$L_{\text{макс}} = E \cdot 10^6 / (B \cdot D \cdot \delta\lambda) \text{ км},$$

где B – скорость передачи, Мбит/с;

D – коэффициент дисперсии, пс/(нм·км);

$\delta\lambda$ – среднеквадратическая ширина спектра источника излучения, нм, (для одномодовых лазеров в документации обычно приводится ширина спектра излучения на уровне -20 дБ или 0,01; в этом случае $\delta\lambda = \Delta\lambda_{0,01} / 6,07$);

$E = 0,306$, если источником излучения является светодиод или одномодовый лазер, а дополнительные потери в тракте составляет 1 дБ;

$E = 0,491$ для тракта *STM-16*, где дополнительные потери равны 2 дБ;

$E = 0,115$, если источником является многомодовый лазер.

В [13] предложена другая методика расчета длины ЭКУ. Полагая, что используется код БВН; ожидаемая длительность одиночного элемента сигнала в ТРР равна $T_{\text{ос}} = \sqrt{T^2 + \Delta T^2}$, где $T = 1/F_T$, равна двум тактовым интервалам, т.е. $T^2 + \Delta T^2 = 4T^2$, получаем $\Delta T^2 = 3T^2 = 3F_T^2$.

Хроматическая дисперсия в ОВ является следствием двух независимых величин: ширины спектра оптической несущей $\Delta\lambda_{0,01}$ и длительности элемента сигнала T .

Уширение импульса, обусловленное только шириной спектра оптической несущей равно $\Delta T_n = |D| \cdot \Delta\lambda_{0,01} \cdot L$.

Уширение импульса, обусловленное только длительностью элемента сигнала равно $\Delta T_c = |D| \cdot 2\lambda_p^2 \cdot L / (c \cdot T) = |D| \cdot 2\lambda_p^2 L F_T / c$, где λ_p – рабочая длина волны, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Результирующее уширение, обусловленное обеими факторами

$$\Delta T = \Delta T_n + \Delta T_c = |D| \cdot L \cdot (\Delta\lambda_{0,01} + 2\lambda_p^2 \cdot F_T / c) = \sqrt{3} / F_T$$

откуда

$$L_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{3}}{|D| \cdot F_T \cdot (\Delta\lambda_{0,01} + 2\lambda_p^2 F_T / c)},$$

Пример расчета длины ЭКУ, ограниченной хроматической дисперсией.

Исходные данные:

- оптическое волокно типа Рек. G.652;
- рабочая длина волны $\lambda_p = 1,55 \text{ мкм} = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$;
- коэффициент дисперсии $D = 18 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ с/м}$;
- ширина спектра излучения $\Delta\lambda = 1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$;
- тактовая частота $F_T = 2,5 \text{ ГГц} = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Гц}$;
- скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Подставляя эти данные в формулу (5.10)

$$L_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{3}}{18 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 \cdot 10^9 \cdot (10^{-9} + 2 \cdot 1,55^2 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^9 / 3 \cdot 10^8)} =$$

$$= 0,0299 \cdot 10^6 \text{ м} = 29,9 \text{ км.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить длину регенерационного участка ВОЛС, лимитированную затуханием. ВОЛС построена на основе кабеля типа ОМЗКГ-10, работающего в 3-м "окне прозрачности", с использованием аппаратуры "Сопка-4". Оценить зависимость длины усилительного участка от изменения потерь на неразъемных соединителях. Потери в разъемных соединителях - 1,5 дБ, в неразъемных соединителях - 0,2; 0,4; 0,6 дБ. Потери на вводе (выводе) - 1,5 дБ. Энергетический запас системы 5 дБ.
2. Определить длину регенерационного участка ВОЛС, ограниченную дисперсией. ВОЛС построена на основе кабеля типа ОМЗКГ-10, с использованием аппаратуры "Сопка-3". Оценить зависимость длины усилительного участка от изменения ширины полосы пропускания оптического волокна. Ширина полосы пропускания оптического волокна, используемого в кабеле: 700 МГц-км и 400 МГц-км.

Литература

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи. В 2 т. Том 1. Теория передачи и влияния: Учебник для вузов / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов и др. - 7-е изд., перераб. и доп. - Москва : Гор. линия-Телеком, 2011. - 424 с.; . ISBN 978-5-9912-0092-9, 1000 экз. - Текст : электронный. - URL: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=256974>
2. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. : Учебное пособие для вузов.-М. Горячая линия -Телеком 2009 г.-268с.;ил.
3. Оптические телекоммуникационные системы: Учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, Р.М. Шарафутдинов; Под ред. В.Н. Гордиенко - Москва : Гор. линия-Телеком, 2011. - 368 с.: ил.; . ISBN 978-5-9912-0146-9, 1000 экз. - Текст : электронный. - URL: <https://new.znanium.com/catalog/product/318817> .
4. Енгибарян И.А., Зуев В.В. Волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие. - Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2012 - 152с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОЛП

ЦЕЛЬ занятия: выработать умения и навыки расчета длины регенерационного участка.

Рекомендации: изучить: [1] Гл.9 с.331; [2] с/127-133.

Краткие сведения из теории

Под надежностью объекта понимают его свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных пределах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (с перерывом связи). Отказы характеризуются плотностью отказов (средним количеством), приходящихся на 100 км трассы в год:

$$m = 100N / (KL) \quad (6.1)$$

где N – число отказов на магистрали длиной L за K лет.

Интенсивность отказов на 1 км трассы в час:

$$M = m / (T_c \cdot L_{100}) \text{ 1/ч,} \quad (6.2)$$

где $T_c = 8765$ ч – число часов в году;

$L_{100} = 100$ км.

Наработка на отказ (среднее время между отказами) – среднее время наработки между двумя последовательными отказами:

$$T_0 = \sum_{i=1}^n (t_i / n) \text{ ч,} \quad (6.3)$$

где n_i – число отказов за принятый календарный срок,

t_i – время исправной работы между $i = k$ и $i = k - 1$ отказами ($k \leq n$).

В период нормальной эксплуатации (после приработки, но до наступления физического износа)

$$M \approx \text{const и } T_0 = 1/M \quad (6.4)$$

Среднее время восстановления T_θ – среднее время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины отказа и устранение последствий отказа.

В качестве комплексного показателя надежности используется коэффициент готовности K_c , определяемый как вероятность того, что окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме запланированных перерывов в работе:

$$K_c = T_0 / (T_0 + T_\theta) \quad (6.5)$$

Иногда в качестве комплексного показателя удобнее использовать коэффициент простоя

$$K_n = 1 - K_c = T_\theta / (T_0 + T_\theta)$$

Если система состоит из n разнотипных элементов, их отказы происходят независимо друг от друга, а отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы в целом, то коэффициент готовности системы равен:

$$K_{cс} = K_{c1} K_{c2} \dots K_{cn}, \quad (6.6)$$

Обычно коэффициенты готовности элементов близки к единице, поэтому коэффициент простоя системы:

$$K_{nc} = K_{n1} + K_{n2} + \dots + K_{nn}, \quad (6.7)$$

а интенсивность отказов системы равна:

$$M_c = M_1 + M_2 + \dots + M_n. \quad (6.8)$$

Требуемые показатели надежности первичной сети магистральной (МГ), внутризоновой (ВЗ) и местной (МС) ЕСЭ с максимальной протяженностью L_M (без резервирования) приведены в Таблице 6.1

Таблица 6.1

Объект	L_M , км	$K_{\Sigma M}$	T_{OM} , ч
ОЦК независимо от применяемой системы передачи	(МГ) – 12500	$> 0,920$	$> 12,54$
	(ВЗ) – 1400	$> 0,990$	$> 111,4$
	(МС) – 200	$> 0,997$	> 400
ОЦК на перспективной цифровой сети	(МГ) – 12500	$> 0,982$	> 230
	(ВЗ) – 1400	$> 0,998$	> 2050
	(МС) – 200	$> 0,9994$	> 7000

Кроме того установлены следующие нормативы:

- время восстановления НРП $T_{внрп} \leq 2,5$ ч (в том числе время подъезда 2ч);
- время восстановления ОРП и ОП $T_{воп} \leq 0,5$ ч;
- время восстановления ВОК $T_{вок} \leq 10$ ч (в том числе время подъезда 3.5 ч).

Плотность отказов ВОК при проектировании транссибирской магистрали бралась равной $m = 0,15$. Плотность отказов ВОЛП – ВЛ в зависимости от напряжения ВЛ составляет от 0,03 до 0,08.

Учитывая, что наименее надежным элементом системы передачи является лазерный диод передающего модуля, можно ориентировочно взять наработку на отказ аппаратуры $T_{oa} \approx 50000$ ч.

Среднее значение наработки на отказ одной строительной длины ВОК на длине волны 1,55 мкм $T_{ок} = 3225000$ ч (по документации на ВОК).

Расчет требуемых показателей надежности для проектируемого канала протяженностью на L

$$\text{наработка на отказ} \quad T_{OL} = T_{OM} L_M / L \quad (6.9)$$

$$\text{коэффициент готовности} \quad K_{GL} = [1 + L(1 - K_{GM}) / (L_M \cdot K_{GM})]^{-1} \quad (6.10)$$

$$\text{коэффициент простоя} \quad K_{ПЛ} \approx K_{нм} \cdot L / L_M \quad (6.11)$$

Расчет ожидаемых показателей надежности линейно-кабельных сооружений (ЛКС)

Интенсивность отказов для всей длины трассы

$$M_{ЛКС} = M_{виск} + M_{внк} + M_{внрп}, \quad (6.12)$$

где $M_{виск} = \frac{mL}{8765 \cdot 100}$ – интенсивность отказов, обусловленная воздействием на ВОК внешних причин (работа сторонних организаций, природные явления и др.);

$$M_{внк} = M_{сд} \cdot n_{сд} = \frac{n_{сд}}{T_{ок}} \quad \text{– интенсивность отказов, обусловленное воздействием на ВОК}$$

внутренних причин (технологические погрешности при изготовлении кабеля);

$$M_{внрп} = 0,06 \cdot n_{нрп} / 8765 \quad \text{– интенсивность отказов, обусловленная внешним воздействием на НРП (0,06 на 1 НРП в год).} \quad (6.14)$$

$$\text{Нарботка на отказ ЛКС: } T_{олкс} = 1 / M_{ЛКС} \quad (6.15)$$

$$\text{Коэффициент готовности ЛКС: } K_{злкс} = T_{олкс} / (T_{олкс} + T_{влкс}) \quad (6.16)$$

Расчет ожидаемых показателей надежности аппаратного комплекса

– Интенсивность отказов аппаратного комплекса

$$M_A = M_{OP} + M_{HPP}, \quad (6.17)$$

где $M_{on} = \sum_i^n M_{oni} = \sum_i^n (1 / T_{ooni})$ – интенсивность отказов ОП и ОРП;

$$M_{hpn} = \sum_i^n M_{hpmi} = \sum_i^n (1 / T_{onpmi}) \text{ – интенсивность отказов НРП.}$$

– Нарботка на отказ аппаратного комплекса: $T_{OA} = 1 / M_A$, (6.18)

– Коэффициент готовности аппаратного комплекса:

$$K_{GA} = K_{GOP} \cdot K_{GHP} \quad (6.19)$$

где $K_{GOP} = T_{0OP} / (T_{0OP} + T_{BOP})$;

$K_{GHP} = T_{0HPP} / (T_{0HPP} + T_{BHP})$.

Ожидаемые показатели надежности системы в целом

– Интенсивность отказов системы $M_c = M_{ЛКС} + M_A$, (6.20)

– Нарботка на отказ $T_{oc} = 1 / M_c$, (6.21)

– Коэффициент готовности $K_{GC} = K_{ГЛКС} \cdot K_{GA}$, (6.22)

Полученные значения ожидаемых параметров надежности сравниваются со значениями требуемых показателей для существующей и перспективной первичных сетей. При необходимости определяются мероприятия, позволяющие повысить надежность проектируемой системы.

Пример расчета основных параметров надежности системы.

Исходные данные:

- участок магистральной первичной сети протяженностью $L = 300$ км;
- строительная длина кабеля $L_{cd} = 6$ км;
- количество аппаратуры – 2 оконечных мультиплексора и 3 мультиплексора ввода/вывода;
- плотность отказов ВОК $m = 0,15$;
- наработка на отказ аппаратуры $T_{OA} \approx 50000$ ч.;
- среднее значение наработки на отказ одной строительной длины $T_{OK} = 3225000$ ч.;
- время восстановления аппаратуры $T_{BA} = 0,5$ ч.;
- время восстановления ВОК $T_{BOK} = 10$ ч.;

Требуемые показатели надежности

Для существующих сетей:

$$T_{OL} = 12,54 \cdot 12500 / 300 = 522 \text{ ч.};$$

$$K_{GL} = \left[\frac{1 + 300(1 - 0,92)}{(12500 \cdot 0,92)} \right]^{-1} = 0,998;$$

Для перспективных сетей:

$$T_{OLP} = 230 \cdot 12500 / 300 = 9583 \text{ ч.}$$

$$K_{GLP} = \left[\frac{1 + 300(1 - 0,982)}{(12500 \cdot 0,982)} \right]^{-1} = 0,99956$$

Ожидаемые показатели надежности линейно-кабельных сооружений

Интенсивность отказов для всей длины трассы

$$M_{ЛКС} = \frac{0,15 \cdot 300}{8765 \cdot 100} + \frac{50}{3225000} = 0,0000665$$

Нарботка на отказ

$$T_{OLКС} = 1 / 0,0000665 = 15037,6 \text{ ч.}$$

Коэффициент готовности

$$K_{ГЛКС} = \frac{15037,59}{15037,59 + 10} = 0,99933$$

Ожидаемые показатели надежности аппаратного комплекса
Интенсивность отказов

$$M_A = 4 / 50000 = 0,0008$$

Наработка на отказ

$$T_{OA} = 1 / 0,0008 = 12500 \text{ ч.}$$

Коэффициент готовности

$$K_{ГА} = \frac{12500}{12500 + 10} = 0,9992$$

Ожидаемые показатели надежности системы в целом
Интенсивность отказов

$$M_C = 0,0000665 + 0,00008 = 0,0001465$$

Наработка на отказ

$$T_{OC} = 1 / 0,0001465 = 6825,9 \text{ ч.}$$

Коэффициент готовности

$$K_{ГС} = 0,99933 \cdot 0,9992 = 0,99853$$

Таким образом, показатели надежности системы удовлетворяют требованиям для существующих сетей, но не удовлетворяют требованиям надежности для перспективных сетей.

Литература

1. Оптические телекоммуникационные системы: Учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, Р.М. Шарафутдинов; Под ред. В.Н. Гордиенко - Москва: Гор. линия-Телеком, 2011. - 368 с.: ил.; . ISBN 978-5-9912-0146-9, 1000 экз. - Текст : электронный. - URL: <https://new.znaniy.com/catalog/product/318817> (дата обращения: 13.01.2020).
2. Енгибарян И.А., Зуев В.В. Волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие. – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2012 – 152с.