

32.889
К12

В. Е. Власов, Ю. А. Парфенов,
Л. Г. Рысин, Л. И. Кайзер

КАБЕЛИ СКС НА СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ



ЭК ТРЕНДЗ

32,889

K12



Власов В.Е., Парфенов Ю.А.,
Рысин Л.Г., Кайзер Л.И.

Кабели СКС

на сетях электросвязи

Теория, конструирование, применение

ЭКСТРЕНДЗ

Москва, 2006

УДК 621.391
621.395.73:621.315
ББК 32.88
К12

Издано при финансовой поддержке
Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям
в рамках Федеральной целевой программы «Культура России»

В.Е. Власов, Ю.А. Парфенов, Л.Г. Рысин, Л.И. Кайзер

К12 Кабели СКС на сетях электросвязи: теория, конструирование, применение. — М.: Эко-Трендз, 2006. — 280 с.: ил.

ISBN 5-88405-080-1

Изложены основы теории кабелей электросвязи (первичные и вторичные параметры, электромагнитные процессы, неоднородности в цепях и т.д.), определено место структурированных кабельных систем в Единой сети электросвязи (ЕСЭ) России.

Представлены основные положения и требования к организации широкополосного доступа на сетях ЕСЭ с помощью цифровых кабелей и оборудования широкополосных систем доступа с цифровым уплотнением (DSL).

Рассмотрены вопросы конструирования и изготовления универсальных кабелей структурированных кабельных систем и широкополосного доступа.

Для широкого круга специалистов, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией линий связи, производством кабелей. Может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



ББК 32.88

ISBN 5-88405-080-1

© Авторы, 2006

Книга издана при участии компании «Эликс-Кабель»



242-219

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время одной из актуальных задач стало создание мультисервисных сетей, посредством которых можно предоставить абонентам полный набор информационных услуг: выход в сеть Интернет, доступ к локальным сетям, телефония, мультимедиабиблиотеки, видео по заказу, телемагазины и др.

Идея «Все услуги по одному кабелю» родилась из концепции обеспечения процесса цифровизации информационных потоков для всех видов сетей. Вместо множества отдельных выделенных цифровых сетей предполагается организовать одну мультисервисную «суперсеть», в которой будут циркулировать все виды информации, необходимые для деятельности человека.

При современном уровне развития техники связи это возможно, однако во главу угла процесса создания такой сети должна быть поставлена ее технико-экономическая эффективность.

Одной из задач развития мультисервисных сетей является создание систем абонентского доступа, имеющих высокие скоростные характеристики. Существует четыре подхода к решению этой задачи:

- DSL-системы;
- Ethernet-доступ;
- пассивные оптические сети (Passive Optical Network, PON);
- широкополосный беспроводный доступ (ШБД).

В книге освещены вопросы, касающиеся применения кабелей с медными жилами с оборудованием цифрового уплотнения (DSL). Представляет интерес оценка возможности применения технологий широкополосного доступа (ADSL, ADSL+, ADSL2+), требующих значительных диапазонов частот на конструкциях кабелей СКС, обеспечив их техническими характеристиками в диапазоне частот, используемых для сетей связи.

Конечная цель — познакомить читателей с результатами исследований, разработками конструкций кабелей, технологиями их изготовления и применения как на сетях СКС, так и на цифровых сетях широкополосного доступа ЕСЭ.

Глава 5. Основные характеристики оборудования СКС	55
5.1. Общие положения	55
5.2. Коды низкоскоростных СКС.....	56
5.3. Коды высокоскоростных СКС	58
Глава 6. Модель ЭМС линий СКС для кодов низкоскоростных электрических систем.....	63
6.1. Основные положения.....	63
6.2. Модель ЭМС цепей в кабелях СКС для манчестерского кода	63
6.3. Модель взаимных влияний между цепями ЦСП при однокабельной системе связи	67
6.4. Взаимные влияния между цепями горизонтальной проводки СКС.....	70
6.5. Упрощенная оценка условий ЭМС в кабельных линиях структурированных систем	74
Раздел 3. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ДОСТУП НА СЕТЯХ ЕСЭ.....	77
Глава 7. Классификация технологий DSL на медных кабелях.....	77
7.1. Основные положения.....	77
7.2. Перспективы развития технологий xDSL. Требования к кабелям широкополосного доступа.....	82
7.3. Технические характеристики оборудования симметричных систем доступа DSL.....	84
7.4. Технические характеристики асимметричных технологий широкополосного доступа	85
7.5. Основные технические требования к кабелям широкополосного доступа.....	90
7.6. Обеспечение условий ЭМС для кабелей широкополосного доступа.....	91
Раздел 4. КОНСТРУИРОВАНИЕ КАБЕЛЕЙ СКС И ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА НА ЭТАПЕ СОЗДАНИЯ ЕСЭ РФ.....	93
Глава 8. Общие требования к конструктивным и электрическим характеристикам кабелей СКС и широкополосного доступа	93
8.1. Конструкции кабелей СКС.....	93
8.2. Материалы изоляции проводников.....	98
8.3. Внешние оболочки	99
8.4. Экранированные горизонтальные кабели	99
8.5. Кабели ГТС с полиэтиленовой изоляцией жил в пластмассовой оболочке	101

Глава 5. Основные характеристики оборудования СКС	55
5.1. Общие положения	55
5.2. Коды низкоскоростных СКС.....	56
5.3. Коды высокоскоростных СКС	58
Глава 6. Модель ЭМС линий СКС для кодов низкоскоростных электрических систем.....	63
6.1. Основные положения.....	63
6.2. Модель ЭМС цепей в кабелях СКС для манчестерского кода	63
6.3. Модель взаимных влияний между цепями ЦСП при однокабельной системе связи	67
6.4. Взаимные влияния между цепями горизонтальной проводки СКС.....	70
6.5. Упрощенная оценка условий ЭМС в кабельных линиях структурированных систем	74
Раздел 3. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ДОСТУП НА СЕТЯХ ЕСЭ.....	77
Глава 7. Классификация технологий DSL на медных кабелях.....	77
7.1. Основные положения.....	77
7.2. Перспективы развития технологий xDSL. Требования к кабелям широкополосного доступа.....	82
7.3. Технические характеристики оборудования симметричных систем доступа DSL.....	84
7.4. Технические характеристики асимметричных технологий широкополосного доступа	85
7.5. Основные технические требования к кабелям широкополосного доступа.....	90
7.6. Обеспечение условий ЭМС для кабелей широкополосного доступа.....	91
Раздел 4. КОНСТРУИРОВАНИЕ КАБЕЛЕЙ СКС И ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА НА ЭТАПЕ СОЗДАНИЯ ЕСЭ РФ.....	93
Глава 8. Общие требования к конструктивным и электрическим характеристикам кабелей СКС и широкополосного доступа	93
8.1. Конструкции кабелей СКС.....	93
8.2. Материалы изоляции проводников.....	98
8.3. Внешние оболочки	99
8.4. Экранированные горизонтальные кабели	99
8.5. Кабели ГТС с полиэтиленовой изоляцией жил в пластмассовой оболочке.....	101

Глава 9. Основные положения теории передачи, взаимных влияний и экранирования в кабелях связи	104
9.1. Общие положения	105
9.2. Сравнение процессов экранирования и процессов передачи энергии по электрическим цепям КШД.....	107
9.3. Принцип действия магнитных и немагнитных экранов ...	111
9.4. Экранирование КШД от внешних помех	113
9.5. Физические процессы в составных экранах	117
9.6. Диэлектрические прокладки в многослойных экранах....	120
9.7. Оптимальные конструкции многослойных комбинированных экранов	122
9.8. Параметры передачи симметричных экранированных цепей.....	125
9.9. Некоторые выводы из теории экранирования скрученных цепей	134
9.10. Основные положения скрутки цепей в КШД	141
9.11. Выбор вида скрутки изолированных жил в группы.....	149
Глава 10. Основы конструирования универсальных КШД	156
10.1. Системный подход к конструированию КШД	156
10.2. Метод оптимизации КШД	161
10.3. Математическая модель расчета конструкции КШД.....	169
10.4. Расчет токопроводящих жил КШД.....	176
10.5. Особенности конструирования изоляции токопроводящих жил герметизированных КШД	178
10.6. Особенности конструирования сердечников КШД	184
10.7. Конструирование поясной изоляции	190
10.8. Конструирование и расчет оболочек и экранов.....	193
Глава 11. Особенности технологии изготовления универсальных кабелей СКС и КШД	198
11.1. Общие сведения об основном технологическом оборудовании, применяемом при производстве КШД	198
11.2. Основные схемы производства изолированных токопроводящих жил	199
11.3. Изготовление токопроводящих жил	202
11.4. Изолирование токопроводящих жил	209
11.5. Скрутка КШД	223
Раздел 5. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ СКС И КШД ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ «ЭЛИКС-КАБЕЛЬ» И ОБЛАСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	237
Глава 12. Конструкции кабелей СКС-КШД производства компании «Эликс-Кабель»	237
12.1. Номенклатура и область применения.....	237

12.2. Конструкции кабелей СКС и КШД	246
12.3. Основные электрические характеристики кабелей компания «Эликс-Кабель», используемых на сетях СКС.....	248
12.4. Основные электрические характеристики кабелей СКС-КШД в диапазоне использования сетей широкополосного доступа.....	250
Глава 13. Применение универсальных кабелей СКС-КШД на цифровых сетях абонентского доступа.....	253
13.1. Сравнительная оценка возможности кабелей СКС-КШД и ТПП _{ЭП}	253
13.2. Типовые схемы организации сетей доступа на линиях местной связи с применением СКС-КШД и оборудования DSL	260
13.3. Применение оборудования FlexGain PCM 4/5 на кабеле МВПЗБШп 2×2×0,64	261
13.4. Применение оборудования FlexGain PCM11/12 на кабеле МВПЗБШп	262
13.5. Применение оборудования FlexGain PCM 4d на кабеле МВПЗБШп	265
Заключение	269
Список сокращений	272
Литература.....	274

Предисловие авторов

Предлагаемую читателям книгу авторы решили написать, имея за спиной большой опыт работы в ЛОНИИС, ВНИИКП и на кабельных заводах. Теоретические исследования, разработка технических требований, выбор конструкций кабелей связи, их технологии изготовления, линейные испытания и внедрение на сетях Единой сети электросвязи Российской Федерации (ЕСЭ РФ) положены в основу данного издания.

Итак, кабели электросвязи, и все, связанное с ними, — наша теория, технология, опыт внедрения.

Но вот лет 10–12 тому назад появился новый класс кабелей для интеллектуальных зданий — это кабели структурированных кабельных систем (СКС). Другие диапазоны частот, другое оборудование, другие принципы организации сетей, другие стандарты, другая терминология, иные требования к электрическим характеристикам. Авторам стало необходимо принимать участие во внедрении и сертификационных испытаниях кабельных изделий для структурированных кабельных систем. Чем больше вникали мы в технику сетей СКС, тем больше возникало вопросов.

А СКС получили и получают все большее и большее развитие и распространение. Захватываются радиодиапазоны 100, затем 200 и далее 600, 700 МГц... И все это по отечественным «медным» жилам!

И вот мы, специалисты-кабельщики, со стажем более 40 лет и опытом работ в области создания кабелей связи, решили изложить свой взгляд на теорию кабелей, технологии их изготовления и обобщить опыт конструирования и внедрения кабелей СКС. Возможно, некоторые положения будут спорными.

Не претендуя на авторство основных положений, касающихся СКС, не подвергая их «ревизии», учитывая бурное развитие ЕСЭ РФ и, в частности, сегмента инфокоммуникационной сети, мы хотели бы обратить внимание на возросший интерес к применению кабелей СКС на сетях ЕСЭ РФ.

Появился целый класс таких кабелей — *кабели широкополосного доступа* (КШД) на местных сетях. Конструктивно и по диапазону частот они отличаются от кабелей СКС, но в основу положен *главный* элемент — «скрученная» пара (в терминологии СКС «витая» пара).

В последних работах по сертификации (декларированию) «Правила применения кабелей связи с металлическими жилами» в классификации кабелей СКС введены требования к кабелям категорий 5е и 6. Кабели категорий 1, 3 и 5 теперь не относятся к кабелям структурированных кабельных систем.

К разряду каких кабелей их следует отнести и каким требованиям они должны отвечать? Мы полагаем, что они создадут новый класс кабелей связи — кабели широкополосного доступа.

В предлагаемой книге мы хотели бы развить эту концепцию. Поскольку «прародителями» КШД являются кабели СКС, то, пользуясь их схожестью, не нарушая «генной основы», которой является «витая» пара, изложим наш взгляд на теорию, конструирование и применение кабелей СКС на сетях широкополосного доступа.

Для обобщения воспользуемся работами авторов по СКС [29] и стандартами [27, 28]. Будем цитировать, уточнять и пытаться находить правильный единый подход и формулировки.

Нельзя не отметить, что в последнее время в связи с развитием компьютерных сетей и систем все большее значение приобретают вопросы информационной безопасности. Известно, что информационная безопасность может быть обеспечена на должном уровне только при комплексном использовании организационных, программных, технических и прочих методов и средств, в том числе и защитой от несанкционированного воздействия на среду передачи, которой являются кабели.

По сетям СКС разработано множество стандартов, написано много книг, разработаны различные конструкции кабелей, внедрено бесчисленное количество объектов СКС.

А все-таки авторы хотели бы изложить свою точку зрения.

Цель: создание единого подхода к теории кабелей связи, уточнение терминологии, разработка модели конструирования, уточнение электрических норм на кабели широкополосного доступа и сети СКС.

Предисловие от компании «Эликс-Кабель»

Когда в нашу компанию поступило предложение принять участие в подготовке и написании книги «Кабели СКС на сетях электросвязи», то мы, ни минуты не сомневаясь, согласились.

В настоящее время в кабельной промышленности, наряду с оптическими, кабели СКС — наиболее развивающееся направление в России и в мире.

Однако в России это направление разработки, конструирования и производства кабелей имеет свои особенности. Они связаны с тем, что в основном для создания структурированных кабельных систем использовались оборудование и кабельная продукция исключительно импортного производства.

Всего лишь два-три российских кабельных завода, в том числе и завод компании «Эликс-Кабель», закупив современное оборудование, организовали серийный выпуск кабелей для СКС. Стратегия компании, в отличие от других заводов, заключалась в создании целого ряда кабелей этого целевого назначения. Заранее предвидев широкие возможности эксплуатации данных кабелей на сетях электросвязи, компания специально разработала кабели с числом пар до 100 включительно для различных условий прокладки и эксплуатации (по стенам зданий, опорам линий передач, в канализации и т.д.).

В процессе разработки, производства и эксплуатации мы столкнулись с противоречиями в терминах, методах испытаний, определениях подхода к конструированию, которые используют системные интеграторы и «классические» связисты. Я помню, как примерно три года назад познакомил двух авторитетных специалистов: «классического» связиста-кабельщика с более чем пятидесятилетним стажем работы в этой области Ю.А. Парфенова — одного из авторов этой книги, и одного из ведущих специалистов в России в области структурированных кабельных систем, соавтора ставшей классической книги «Структурированные кабельные системы» А.Б. Семенова. В первые часы общения они вообще не понимали друг друга, как будто разговаривая на разных языках.

Усилия авторов книги в значительной степени направлены на то, чтобы сблизить позиции и способствовать взаимопониманию этих двух категорий специалистов, чему способствуют главы книги, посвященные использованию малопарных кабелей в сетях широкополосного доступа.

Впервые, на мой взгляд, в книге показано, что основные положения теории кабелей связи и принципы построения сетей связи распространяются на кабели СКС, конструктивные и технологические принципы соответствуют принятым подходам в кабельной промышленности. Книга, несомненно, будет полезна производителям кабелей для СКС и широкому кругу специалистов, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией СКС.

Рысин Л.Г.

Генеральный директор ООО «Эликс-Кабель», к.т.н.



Раздел 1

ОСНОВЫ ТЕОРИИ КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Глава 1. Термины и определения

1.1. Первичные параметры цепи

Основными характеристиками, определяющими величину тока и напряжения в каждой точке симметричной или коаксиальной цепи, являются четыре первичных параметра передачи: активное электрическое сопротивление R , индуктивность L , емкость C и проводимость изоляции G . Эти параметры равномерно распределены по всей длине цепи. Следовательно, кабель связи представляет собой однородную линию с равномерно распределенными параметрами. В технике кабелей связи принято определять все параметры на 1 км длины цепи [5–9].

Активное электрическое сопротивление кабельной цепи складывается из сопротивлений двух токопроводящих жил и потерь, обусловленных влиянием электромагнитного поля рассматриваемой цепи на соседние проводники и другие металлические части конструкции кабеля (экран, металлическую оболочку и др.).

При расчете активного сопротивления кабельной цепи его удобно представлять в виде двух слагаемых: сопротивления постоянному току и сопротивления, вызванного изменением электромагнитного поля переменного тока.

Электрическое сопротивление цепи постоянному току, Ом/км, определяется по формуле

$$R_0 = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{4l}{\pi d^2}, \quad (1.1)$$

где ρ — удельное сопротивление металла проводника (медь — 0,0175 Ом·мм²/м, алюминий — 0,0291 Ом·мм²/м); d — диаметр проводника, мм; l — длина проводника, км; s — площадь поперечного сечения проводника, мм².



Для определения активного сопротивления и индуктивности кабельной цепи при переменном токе расчетные формулы выводятся из основных уравнений электромагнитного поля.

Индуктивность кабельной цепи складывается из внутренней индуктивности каждого проводника и внешней индуктивности, обусловленной внешним магнитным потоком.

Емкость кабельной цепи аналогична емкости конденсатора, у которого роль обкладок выполняют токопроводящие жилы (проводники), а диэлектриком служит изолирующий их материал.

Емкость кабельной цепи в кабельной технике принято называть *рабочей емкостью*, в отличие от частичных емкостей, т.е. емкостей между любыми отдельными жилами и жилами и оболочкой кабеля.

Проводимость изоляции кабельной цепи складывается из проводимости изоляции постоянному току и проводимости изоляции переменному току.

Проводимость изоляции переменному току зависит от диэлектрических потерь и частоты тока.

Явление диэлектрических потерь в кабеле рассматривается как физический процесс в конденсаторе, характеризующийся тем, что ток опережает напряжение не на 90° , а на угол $(90^\circ - \delta)$. Угол δ называется *углом диэлектрических потерь*. Проводимость, обусловленная диэлектрическими потерями, равна $G_f = \omega C \operatorname{tg} \delta$, следовательно,

$$G = G_0 + G_f = G_0 + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (1.2)$$

Для сложной комбинированной изоляции (диэлектрик плюс воздух) определяется эквивалентная величина $\operatorname{tg} \delta$, которая значительно меньше $\operatorname{tg} \delta$ сплошного диэлектрика.

Как правило, нормы на сопротивление изоляции (обратная величина проводимости изоляции) даются при 20°C . С повышением температуры у всех видов изоляции сопротивление понижается.

Первичные параметры передачи цепи (R , L , C и G) зависят от диаметра и материала проводников, расстояния между ними, типа изоляции, температуры и частоты тока. Количественная и качественные характеристики этой зависимости для симметричных и коаксиальных пар несколько различные и будут рассмотрены ниже.

1.2. Вторичные параметры цепи

При распространении электромагнитной энергии по длинной кабельной линии напряжение между проводниками и ток в проводниках не остаются по-

стоянными, а меняются по абсолютному значению и по фазе. Отношения между током и напряжением в любой точке цепи и током и напряжением в начале цепи зависят от двух параметров — волнового сопротивления $Z_{\text{в}}$ и коэффициента распространения γ , которые носят название *вторичных параметров передачи*. Они относятся к основным показателям, характеризующим электрические свойства цепи.

Волновое сопротивление определяется отношением напряжения к току в любой точке цепи и выражается через первичные параметры по формуле

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}. \quad (1.3)$$

Волновое сопротивление выражается в омах, если активное сопротивление R выражено в Ом/км, индуктивность L — в Г/км, емкость C — в Ф/км и проводимость G — в См/км.

В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной. Для всех однородных цепей $R/L > G/C$, поэтому угол волнового сопротивления отрицателен.

При $R \ll \omega L$ и $G \ll \omega C$, т.е. для частот свыше 5...10 кГц, волновое сопротивление определяется по следующей упрощенной формуле:

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{L/C}. \quad (1.4)$$

Коэффициент распространения γ характеризует изменение мощности электромагнитной волны при распространении ее по линии и изменение фазы напряжения и тока вдоль линии. Коэффициент распространения — комплексная величина, причем действительная составляющая α определяет затухание, т.е. уменьшение напряжения и тока на единицу длины цепи, а мнимая составляющая β характеризует величину изменения фазы напряжения и тока на единицу длины линии.

Коэффициент распространения через первичные параметры выражается формулой

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L) \cdot (G + i\omega C)}, \quad (1.5)$$

где α выражается в неперах/км (Н/км); 1 Н = 8,69 дБ и β — в рад/км.

Обычно коэффициент распространения γ определяют на 1 км цепи. Затухание цепи на 1 км (α) называют *коэффициентом затухания*, а сдвиг фазы на 1 км (β) — *коэффициентом фазы*.

Коэффициенты затухания и фазы зависят от частоты и от температуры. Для диапазона высоких частот коэффициент затухания α , дБ/км, вычисляется по следующей упрощенной формуле:

$$\alpha = 8,69 \left[\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right]. \quad (1.6)$$

Коэффициент фазы β , рад/км, можно представить как

$$\beta = \omega \sqrt{LC}. \quad (1.7)$$

Скорость распространения, км/с, электромагнитных волн вдоль цепи

$$v = \omega / \beta = \omega / (\omega \sqrt{LC}). \quad (1.8)$$

Длина волны λ , км — расстояние между ближайшими точками цепи, в которых фазы напряжения или тока в любой момент времени отличаются на 2π :

$$\lambda = 2\pi / \beta = v / f, \quad (1.9)$$

где f — частота тока, Гц.

Вторичные параметры передачи цепей так же, как и первичные, зависят от диаметра и материала проводников, типа изоляции, температуры и частоты тока.

1.3. Электромагнитные процессы в симметричных кабелях

Сопротивление и индуктивность цепи симметричного кабеля зависят от частоты тока. При прохождении по цепи тока высокой частоты внутри каждого проводника образуются вихревые токи, которые замыкаются в толще проводника по траекториям, похожим на эллипсы (рис. 1.1, а). Направление вихревых токов в проводнике всегда совпадает с направлением передаваемого по поверхности проводника тока. Таким образом, ток вытесняется из центра проводника на его поверхность. Это явление называется *поверхностным эффектом*. Вследствие потерь на вихревые токи активное сопротивление проводника возрастает.

Кроме того, в близкорасположенном обратном проводнике возникают также вихревые токи, которые замыкаются в толще соседнего проводника (рис. 1.1, б). Направление вихревых токов такое же, как у вихревых токов прямого проводника, т.е. в удаленных точках соседнего проводника совпадает с направлением передаваемого тока и в более близких точках противоположно ему. Если по соседнему проводу передается ток противоположного направления (обратный ток), то вихревые токи совпадают по направлению с обратным передаваемым током в более близких точках соседнего проводника и противоположно направлены в удаленных точках. Таким образом, передаваем-

мый в соседнем проводнике обратный ток фактически вытесняется на ближнюю часть цилиндрической поверхности. Это явление называется *эффектом близости* (сближения).

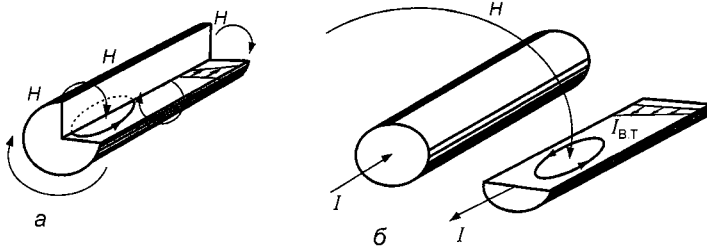


Рис. 1.1. Схема образования вихревых токов:
а — при поверхностном эффекте; б — при эффекте близости
(H — напряженность магнитного поля, I — рабочий ток; $I_{вт}$ — вихревой ток)

Вследствие потерь на вихревые токи в соседнем проводнике активное сопротивление цепи также возрастает.

С учетом всех этих потерь активное сопротивление цепи R при высокой частоте определяется формулой

$$R = R_0 \chi \left[1 + F + \frac{PG_1 \left(\frac{d_0}{a} \right)^2}{1 - H \left(\frac{d_0}{a} \right)^2} \right] + \Delta R, \quad (1.10)$$

где R_0 — электрическое сопротивление цепи постоянному току; F — коэффициент, учитывающий потери в проводнике вследствие поверхностного эффекта; P — коэффициент, учитывающий потери в проводниках второй пары этой же четверки: для звездной скрутки $P = 5$, для двойной парной скрутки $P = 2$; G_1 — коэффициент, учитывающий потери в проводнике вследствие эффекта близости; H — коэффициент, учитывающий потери в проводнике вследствие повторного действия эффекта близости; χ — коэффициент спиральности скрутки; $\chi = 1,02$; ΔR — дополнительное сопротивление вследствие потерь на вихревые токи в соседних четверках и металлической оболочке; d_0 — диаметр проводника, мм; a — расстояние между центрами проводников, мм.

Это дополнительное сопротивление рассчитывается по приближенной формуле

$$\Delta R = 0,085 \sqrt{\frac{f}{(n+2)}},$$

где f — частота, Гц; n — число четверок в кабеле.

Индуктивность цепи L , Г/км, при высоких частотах

$$L = \left(4 \ln \frac{2a - d_0}{d_0} + Q \right) 10^{-4}, \quad (1.11)$$

где Q — коэффициент, учитывающий вытеснение магнитного поля из проводника вследствие поверхностного эффекта.

Коэффициенты F , G_I , H и Q определяются в зависимости от параметра X , который вычисляется по следующим формулам: $X = 0,0105d_0\sqrt{f}$ — для медных проводников; $X = 0,081d_0\sqrt{f}$ — для алюминиевых проводников, где f — частота тока, Гц.

Значения коэффициентов F , G_I , H и Q в зависимости от X приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Значения коэффициентов F , G_I , H , Q

X	F	G_I	H	Q
0–0,49	0	$X^4/64$	0,0417	1,0
0,5	0,00326	0,000975	0,042	0,9998
1	0,00519	0,01519	0,053	0,997
2	0,0782	0,1724	0,169	0,961
3	0,318	0,405	0,348	0,845
4	0,678	0,584	0,466	0,686
5	1,042	0,755	0,530	0,556
10	2,799	1,641	0,643	0,282
Более 10	$\frac{\sqrt{2} \cdot x - 3}{4}$	$\frac{\sqrt{2} \cdot x - 1}{8}$	0,750	$\frac{2\sqrt{2}}{x}$

1.4. Неоднородности в цепях связи

Одной из важных электрических характеристик цепей связи, определяющих качество телефонной связи и особенно телевизионных передач, является величина неоднородности волнового сопротивления строительных длин или

входного сопротивления на смонтированных усилительных участках. Эти неоднородности появляются в процессе изготовления кабелей вследствие возможной деформации в виде эксцентриситета в расположении проводников, нарушения размеров, формы и взаимного расположения проводников, а также вследствие неоднородности изоляции по длине цепи. Особо важное значение имеют неоднородности волнового сопротивления коаксиальных пар, которые используются в очень широком диапазоне частот — до 60 МГц и более.

Различают неоднородности *внутренние* — в пределах строительной длины кабеля — и *стыковые*, обусловленные различием характеристик волнового сопротивления сопрягаемых длин.

Неоднородности цепи учитываются через коэффициент отражения

$$\rho = \frac{Z'_B - Z''_B}{Z'_B + Z''_B} \approx \frac{\Delta Z_B}{2Z_B}, \quad (1.12)$$

где Z'_B и Z''_B — волновые сопротивления соседних неоднородных участков кабеля; Z_B — номинальное значение волнового сопротивления цепи. Соответственно величина отклонения волнового сопротивления, Ом, определяется как $\Delta Z_B = 2\rho Z_B$.

Реальный кабель можно рассматривать как неоднородную цепь, составленную из отдельных однородных участков. Электромагнитная волна, распространяясь по такому кабелю и встречая на своем пути неоднородность, частично отражается от нее и возвращается к началу линии. При наличии нескольких неоднородных участков волна претерпевает серию частичных отражений.

Неоднородности в кабеле приводят к появлению двух дополнительных потоков энергии в цепи: *встречного (обратного) потока*, состоящего из суммы элементарных отраженных волн в местах неоднородностей и движущегося к началу цепи (рис. 1.2), и *попутного потока энергии*, возникающего из-за двойных отражений и движущегося к концу цепи вместе с основной энергией, передаваемой по кабелю, отставая по фазе. Попутный поток, распространяясь

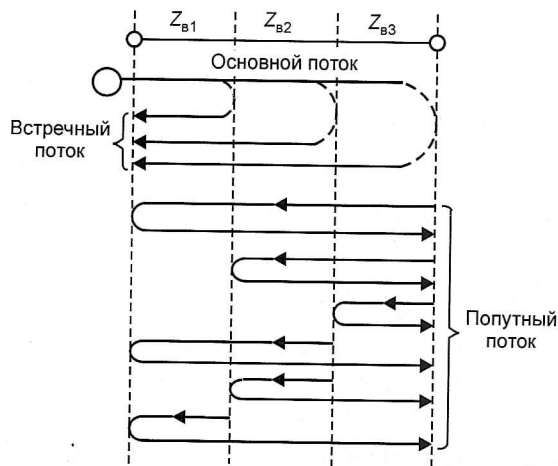


Рис. 1.2. Схемы возникновения встречного и попутного потоков

вместе с основным, искажает форму передаваемого сигнала и создает помехи. Особенно неблагоприятно он сказывается на качестве телевизионной передачи, для которой фазовое соотношение передаваемых и принимаемых сигналов является решающим фактором. Для нормальной передачи телевизионных сигналов величина попутного потока должна составлять не более 1% основного.

Попутный поток за счет внутренних неоднородностей прямо пропорционален длине кабельной линии, а за счет стыковых неоднородностей — числу строительных длин кабеля. Следовательно, попутный поток особенно проявляется на длинных кабельных линиях при уплотнении их системами с частотным распределением каналов (аналоговые системы).

Для цифровых систем передачи попутный поток имеет место только на длине регенерационного участка.

Величина входного сопротивления кабеля $Z_{вх}$ колеблется за счет встречного потока, и характеристика его имеет волнообразный характер. Это затрудняет согласование кабеля с аппаратурой на концах линии и приводит к искажениям в цепи передачи.

Входное сопротивление линии, выраженное через величину эквивалентного коэффициента отражения, отнесенного к началу линии, т.е. через p , можно представить в виде

$$Z_{вх} = Z_{в} (1 + p) / (1 - p) \approx Z_{в} (1 + 2p). \quad (1.13)$$

Для обеспечения высококачественной телефонной передачи необходимо отсутствие амплитудных искажений в цепи и, в первую очередь, постоянства $Z_{вх}$. Для этого техническими условиями на коаксиальные кабели нормируются внутренние неоднородности волнового сопротивления, а на высокочастотные симметричные кабели — величина максимального отклонения рабочей емкости цепи ΔC (не более 3%).

1.5. Причины и параметры взаимного влияния между симметричными цепями

Качество передачи сигналов связи по цепям кабельных линий во многом зависит от величины помех в этих цепях.

Помехами называют посторонние токи и напряжения в цепи, частотный спектр которых совпадает со спектром передаваемых по цепи полезных сигналов. Помехи, возникающие в результате электромагнитного влияния параллельных цепей, называют *линейными*. В случае передачи по параллельным цепям телефонного разговора линейные помехи называют *переходным разговором*.

Взаимные влияния между цепями обуславливаются наличием электрического и магнитного полей вокруг проводов цепи при передаче по ней электромагнитной энергии.

В технике связи применяют двухпроводные цепи. Схема влияния между двухпроводными цепями может быть понятна при рассмотрении рис. 1.3, на котором представлен поперечный разрез проводов двух параллельных цепей. Провода влияющей цепи обозначены цифрами 1 и 2, а провода цепи, подверженной влиянию, — 3 и 4. Сплошными линиями обозначены силовые линии магнитного поля, а пунктирными — линии электрического поля. Напряженность электрического и магнитного полей в точках расположения проводов 3 и 4 неодинакова. Следовательно, в этих проводах возникнут разные по величине электрические заряды и электродвижущие силы.

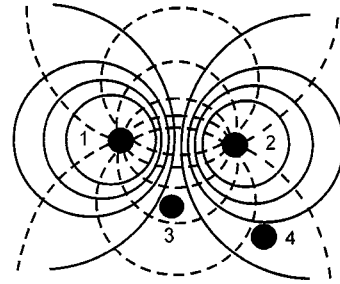


Рис. 1.3. Схема электромагнитного влияния

Если по концам цепи провода 3 и 4 подключены к приемнику (замкнуты между собой на его входное сопротивление), то в проводах цепи возникают уравнительные токи, которые воспринимаются приемником как помехи на концах цепи, подверженной влиянию.

Влияние, обусловленное действием магнитного поля, называют *магнитным влиянием*, а величину, характеризующую магнитное влияние, — *магнитной связью* между цепями.

Величина магнитной связи M_{12} , Ом, определяется отношением наведенной ЭДС E_2 в цепи, подверженной влиянию, к току I_1 влияющей цепи с противоположным знаком, т.е.

$$M_{12} = -E_2/I_1. \quad (1.14)$$

Влияние, обусловленное действием электрического поля, называют *электрическим влиянием*, а величину, характеризующую это влияние, — *электрической связью*. Величина электрической связи C_{12} , определяется отношением наведенного тока I_2 в цепи, подверженной влиянию, к напряжению U_1 во влияющей цепи, т.е.

$$C_{12} = -I_2/U_1. \quad (1.15)$$

В общем виде M_{12} и C_{12} являются комплексными величинами, состоящими из действительной и мнимой частей:

$$\left. \begin{aligned} M_{12} &= r_{12} + i\omega \cdot m; \\ C_{12} &= g_{12} + i\omega \cdot k. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Здесь r_{12} — активная составляющая магнитной связи; m — взаимная индуктивность или индуктивная связь; g_{12} — активная составляющая электрической связи; k — емкостная связь; i — мнимая часть комплексного числа; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, рад/с.

Эквивалентная схема влияния цепи I (влияющей) на цепь II (подверженную влиянию) на единице длины линии s на расстоянии x от начала линии показана на рис. 1.4.

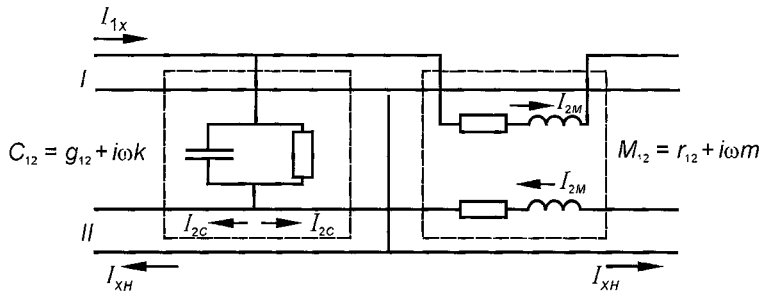


Рис. 1.4. Эквивалентная схема влияния между цепями на единице длины линии

На каждом таком элементарном участке длины линии в цепи II создаются токи, обусловленные электрической C_{12} и магнитной M_{12} связью. При этом ток $I_{2xн}$, направляющийся к началу линии с этого элементарного участка, равен сумме токов от электрического (I_{2c}) и магнитного (I_{2m}) влияния:

$$I_{2xн} = I_{2c} + I_{2m}, \quad (1.17)$$

а ток, направляющийся к концу линии $I_{2xк}$, равен разности этих токов:

$$I_{2xк} = I_{2c} - I_{2m}. \quad (1.18)$$

Общая величина тока помех в начале и конце цепи, подверженной влиянию, определяется суммой токов, пришедших со всех элементарных участков соответственно к началу и концу этой цепи. При суммировании токов учитывают изменение величины влияющего тока при распространении его от начала цепи до каждого элементарного участка, величину электрической и магнитной связи на каждом элементарном участке, а также изменение тока в цепи, подверженной влиянию на пути от элементарного участка при распространении его по этой цепи к ее началу и концу. Изменение токов в цепях, влияющих и подверженных влиянию, зависит от коэффициентов передачи этих цепей ($\gamma = \alpha + i\beta$), т.е. от коэффициентов затухания α , коэффициентов фазы β этих цепей и длины пути токов. Схематически пути перехода токов на всей длине параллельного пробега цепей изображены на рис. 1.5.

В теории влияния конец цепи, на котором включен генератор (передатчик) во влияющей цепи, называют *ближним*, а противоположный конец, на котором включена нагрузка, (приемник), *дальним*. Соответственно рассматривают и два вида влияния – на ближний и дальний концы цепи, подверженной влиянию.

Влияние между цепями принято выражать величиной переходного затухания, дБ.

Величина *переходного затухания на ближнем конце* A_0 , дБ, (рис. 1.6) равна 10 десятичным логарифмам модуля отношения мощности передаваемого сигнала в начале влияющей цепи $P_{1н}$ к мощности помехи $P_{2н}$ в начале цепи, подверженной влиянию.

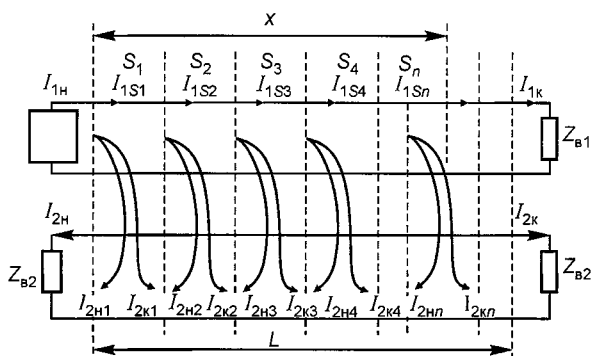


Рис. 1.5. Схема влияния между цепями на отдельных элементарных участках линии

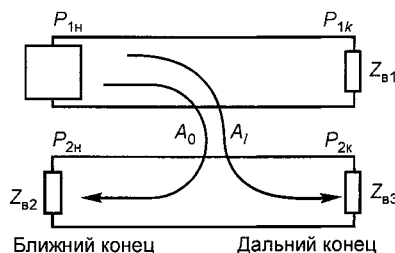


Рис. 1.6. К пояснению понятий переходных затуханий между цепями

Величина *переходного затухания на дальнем конце* A_1 , дБ, равна 10 десятичным логарифмам модуля отношения мощности сигнала в начале влияющей цепи $P_{1н}$ к мощности помехи $P_{2к}$ на дальнем конце цепи, подверженной влиянию.

Если входные сопротивления генератора и приемников равны величинам волновых сопротивлений цепей, в которые они включены, то математические выражения величин A_0 и A_1 могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= 10 \lg \left| \frac{P_{1н}}{P_{2н}} \right| = 10 \lg \left| \frac{U_{1н} I_{1н}}{U_{2н} I_{2н}} \right| = 10 \lg \left| \frac{I_{1н}^2 Z_{в1}}{I_{2н}^2 Z_{в2}} \right| = 10 \lg \left| \frac{U_{1н}^2 Z_{в2}}{U_{2н}^2 Z_{в1}} \right| = \\
 &= 20 \lg \left| \frac{I_{1н}}{I_{2н}} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_{в1}}{Z_{в2}} \right| = 20 \lg \left| \frac{U_{1н}}{U_{2н}} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_{в2}}{Z_{в1}} \right|;
 \end{aligned}
 \tag{1.19}$$

$$\begin{aligned}
 A_l &= 10 \lg \left| \frac{P_{1н}}{P_{2к}} \right| = 10 \lg \left| \frac{U_{1н} I_{1н}}{U_{2к} I_{2к}} \right| = 10 \lg \left| \frac{I_{1н}^2 Z_{в1}}{I_{2к}^2 Z_{в2}} \right| = 10 \lg \left| \frac{U_{1н}^2 Z_{в2}}{U_{2к}^2 Z_{в1}} \right| = \\
 &= 20 \lg \left| \frac{I_{1н}}{I_{2к}} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_{в1}}{Z_{в2}} \right| = 20 \lg \left| \frac{U_{1н}}{U_{2к}} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_{в2}}{Z_{в1}} \right|.
 \end{aligned} \tag{1.20}$$

Если цепи, между которыми рассматривается влияние, одинаковы, т.е. $Z_{в1} = Z_{в2}$, то

$$A_0 = 10 \lg \left| \frac{P_{1н}}{P_{2н}} \right| = 20 \lg \left| \frac{I_{1н}}{I_{2н}} \right| = 20 \lg \left| \frac{U_{1н}}{U_{2н}} \right|,$$

$$A_l = 10 \lg \left| \frac{P_{1н}}{P_{2к}} \right| = 20 \lg \left| \frac{I_{1н}}{I_{2к}} \right| = 20 \lg \left| \frac{U_{1н}}{U_{2к}} \right|.$$

Защищенность между цепями на дальнем конце определяется выражением

$$A_{з1} = 10 \lg \frac{P_{1к}}{P_{2к}}.$$

Различие между переходным затуханием и защищенностью на дальнем конце заключается в том, что в первом параметре фигурирует мощность передаваемого сигнала в начале, и во втором — в конце влияющей цепи.

Оба параметра связаны между собой следующим соотношением: $A_{з1} = A_l - \alpha_l$, где α_l — коэффициент затухания влияющей цепи, дБ/км, l — длина линии, км.

Все параметры определены для синусоидальных сигналов.

Формулы (1.19) и (1.20) дают возможность найти величины переходного затухания между цепями, если известны величины мощностей, напряжений и токов в начале влияющей цепи и соответственно в начале и конце цепи, подверженной влиянию. На линии или в отдельных строительных длинах указанные величины могут быть измерены.

Однако существенный интерес представляет вычисление переходного затухания между цепями расчетным путем через параметры влияния, т.е. через параметры электрических и магнитных связей между цепями. Расчетные формулы влияния дают возможность установить взаимозависимости между параметрами влияния и конструктивными параметрами кабеля. Наличие таких зависимостей позволяет при создании кабелей по требуемым величинам переходного затухания между цепями установить требования к величинам электромагнитных связей. В свою очередь, уже исходя из допустимых величин электромагнитных связей, устанавливаются требования к величинам отдельных коэффициентов связи в строительных длинах и требо-

вания к допускам на конструктивные отклонения отдельных элементов кабелей (диаметров жил, толщины слоя изоляции и др.), а также требования к материалам (однородность изоляции, допуски на отклонения величин диэлектрических потерь в изоляции и проводимости материала жил).

1.6. Электромагнитные связи между цепями в симметричных кабелях

В теории электромагнитное влияние между цепями принято рассматривать раздельно по его составляющим, а именно влияние, обусловленное емкостными связями, и влияние, обусловленное магнитными связями. Общее же результирующее влияние на ближний и дальний концы рассчитывают сложением токов от емкостных и магнитных связей соответственно в нагрузках на ближнем и дальнем концах цепи, подверженной влиянию.

Электрические связи обычно измеряют в единицах проводимости (См), а магнитные — в единицах сопротивления (Ом). При вычислении совместного действия связей или при установлении соотношения между ними необходимо оба вида связей выражать в одинаковых единицах.

Так как при нагрузке цепей на волновые сопротивления $U_1 = I_1 Z_{в1}$ и $I_2 = U_2 / Z_{в2}$, то электрическая связь, определяемая (1.16), но в единицах сопротивления (Ом), равна

$$C_{12} = (g_{12} + i\omega k) Z_{в1} Z_{в2}, \quad (1.21)$$

а магнитная связь в единицах проводимости (См) описывается выражением

$$M_{12} = (r_{12} + i\omega m) Z_{в1} Z_{в2}. \quad (1.22)$$

Электрическая и магнитная связи могут быть выражены и безразмерными величинами, а именно,

$$\begin{aligned} C_{12} &= (g_{12} + i\omega k) \sqrt{Z_{в1} Z_{в2}}; \\ M_{12} &= (r_{12} + i\omega m) \frac{1}{\sqrt{Z_{в1} Z_{в2}}}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Общая электромагнитная связь между цепями на ближнем конце характеризуется коэффициентом электромагнитной связи на ближнем конце N_{12} и описывается суммой электрической и магнитной связей.

Электромагнитная связь между цепями на дальнем конце характеризуется коэффициентом электромагнитной связи на дальнем конце F_{12} и определяется разностью электрической и магнитной связей.

Коэффициенты N_{12} и F_{12} , См, могут, например, быть найдены по формулам:

$$N_{12} = C_{12} + \frac{M_{12}}{Z_{в1}Z_{в2}} = \left[(g_{12} + i\omega k) + \frac{r_{12} + i\omega m}{Z_{в1}Z_{в2}} \right]; \quad (1.24)$$

$$F_{12} = C_{12} - \frac{M_{12}}{Z_{в1}Z_{в2}} = \left[(g_{12} + i\omega k) - \frac{r_{12} + i\omega m}{Z_{в1}Z_{в2}} \right]. \quad (1.25)$$

Для цепей воздушных линий связи расстояние между проводами велико по сравнению с размерами самих проводов, а диэлектрические потери в изоляции ничтожно малы, поэтому величинами активных составляющих магнитной и электрической связей можно пренебречь. Для воздушных линий связи принято считать, что все магнитное влияние определяется величиной m , а электрическое влияние — величиной k . При этом m и k достаточно точно могут быть определены расчетным путем, так как они зависят лишь от диаметров проводов цепей, расстояний между проводами цепи и взаимного расположения проводов цепей, влияющей и подверженной влиянию.

На воздушных линиях связи величины электромагнитных связей между цепями остаются постоянными на всем протяжении параллельного пробега проводов — цепей для каждого профиля линии. Это обстоятельство позволяет за счет введения скрещивания проводов цепей (изменения взаимного расположения проводов) обеспечивать компенсацию связей одного участка связями последующего участка и таким образом за счет предварительного подбора схем скрещивания цепей получить снижение влияния между цепями до требуемых величин.

Характерная особенность кабельных линий в том, что расчет коэффициентов электромагнитной связи между цепями практически не возможен. Это объясняется следующими обстоятельствами.

В кабелях расстояния между проводами соседних цепей весьма малы, соизмеримы (а иногда и меньше) с диаметрами проводов и определяются толщиной изоляции жил. Малейшее нарушение номинала толщины изоляции жил или изменение взаимного расположения жил в четверке, а также жил рассматриваемых цепей по отношению к проводам третьих цепей или относительно оболочки приводит к существенным изменениям величин электромагнитных связей. Предсказать заранее величины электромагнитных связей на любом из элементарных участков параллельного пробега цепей в кабелях не представляется возможным. К тому же, для кабельных линий приходится считаться не только с реактивными (ωm , ωk), но и с активными (r_{12} , g_{12}) составляющими связей.

Снижение величин электромагнитных связей до допустимых пределов в строительных длинах кабелей обеспечивается в процессе изготовления кабеля за счет высокой стабильности технологических процессов производства. Вводится жесткое нормирование допустимых отклонений диаметров жил, толщины изоляционного слоя или элементов конструкции изоляции жил (корделя, ленты). Существенное значение имеют равенство и стабильность величины натяжения жил при скрутке их в группы, чтобы сохранялось заданное расстояние между жилами в группе. Предъявляются высокие требования к однородности материала изоляции и обеспечению жесткости конструкции групп, чтобы при переметках кабеля не было их деформаций. Вводится скрутка жил в группы с разными шагами скрутки (это эквивалентно скрещиванию проводов цепей воздушных линий с очень малыми индексами). Однако уменьшить электромагнитные связи в строительных длинах до такой степени, чтобы на усилительных участках получить величины помех в допустимых пределах без дополнительных мероприятий при соединении строительных длин между собой, не удастся.

Пригодными для прокладки на линии считают те строительные длины, в которых между цепями остаточные электромагнитные связи не превышают допустимых норм в целом на всю строительную длину. Оценку величин остаточных связей в строительных длинах проводят измерением их в каждой строительной длине между всеми параллельными цепями. (Проверяются связи каждой цепи по отношению к каждой, определяются величины влияния между цепями на ближний и дальний концы.)

В реальных кабелях жилы скручиваются в группы и повивы и располагаются в пространстве, по длине кабеля, не параллельно друг другу. Но шаг скрутки или повива во много раз больше, чем диаметры жил и расстояния между ними. Поэтому для выяснения причин возникновения связей в кабелях и их зависимости от конструкции кабелей принимают, что жилы в кабеле расположены внутри четверки (или пары) параллельно друг другу.

Чтобы понять причину появления и физическую сущность отдельных составляющих связей, рассмотрим эквивалентные схемы связей между цепями одной четверки.

Емкостные связи между цепями одной четверки определяются величинами частичных емкостей между проводами 1 и 2 первой основной (I) цепи и проводами 3 и 4 второй основной (II) цепи, как показано на рис. 1.7. Кроме того, в четверке существует фантомная цепь из проводов цепей I и II. Между каждой из основных и фантомной цепями также существуют емкостные связи. Величины емкостной связи между цепями принято определять *коэффициентом емкостной связи* k . При этом между цепями I и II

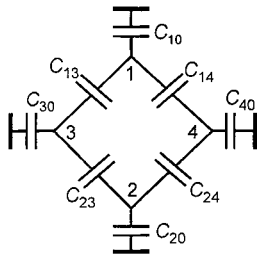


Рис. 1.7. Частичные емкости между жилами четверки и между жилами и оболочкой

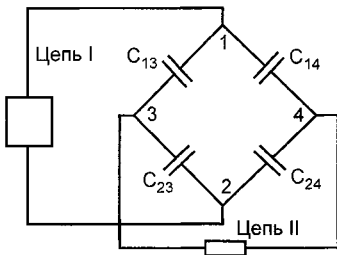


Рис. 1.8. Схема емкостного влияния между цепями четверки

$$k_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23}), \quad (1.26)$$

между I и фантомной цепями

$$k_2 = (C_{13} + C_{14}) - (C_{24} + C_{23}) + e_1/2, \quad (1.27a)$$

между II и фантомной цепями

$$k_3 = (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24}) + e_2/2. \quad (1.27b)$$

Здесь e_1 и e_2 представляют собой коэффициенты емкостной асимметрии цепей I и II относительно земли; а e_3 — то же фантомной цепи относительно земли:

$$\begin{aligned} e_1 &= C_{10} - C_{20}; \\ e_2 &= C_{30} - C_{40}; \\ e_3 &= (C_{10} - C_{20}) - (C_{30} - C_{40}). \end{aligned} \quad (1.28)$$

При определении влияния между цепями разных четверок определяют коэффициенты емкостной связи k_9, k_{10}, k_{11} и k_{12} , которые, как правило, меньше величин k_1, k_2, k_3 .

Схема влияния между цепями одной четверки, определяемого емкостными связями, может быть для наглядности представлена мостовой схемой (рис. 1.8). Если $C_{13} = C_{24}$ и $C_{14} = C_{23}$, то мост находится в уравновешенном состоянии (сбалансирован), $k_1 = 0$ и емкостное влияние между цепями I и II отсутствует. Если $C_{10} = C_{20} = C_{30} = C_{40}$, то k_2 и k_3 также равны нулю, т.е. не будет емкостного влияния и между основными и фантомными цепями.

Таковыми же эквивалентными мостовыми схемами могут быть представлены и влияния, обусловленные частичными составляющими связей m_{12}, g_{12} и r_{12} . При этом частичные индуктивности между жилами могут быть представлены в виде трансформаторов в плечах моста.

Активная составляющая электрической связи g_{12} обусловлена асимметрией потерь в диэлектрике. Она тем больше, чем больше разница диэлектрических потерь в изоляции жил цепи.

Активная составляющая магнитной связи r_{12} обусловлена асимметрией потерь вихревых токов в соседних жилах цепи, экране, оболочке из-за несимметричного расположения жил цепи относительно жил других цепей и оболочки, а также различием диаметров жил цепи.

Соотношение между электрической и магнитной связями зависят от конструкции кабеля и частоты. На низких частотах (до 10...15 кГц) влияние между цепями определяется в основном электрической связью (рис. 1.9).

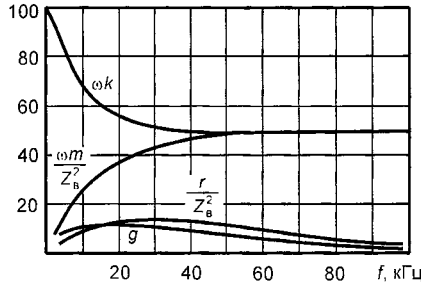


Рис. 1.9. Соотношение составляющих связей внутри четверки

С ростом частоты увеличивается составляющая магнитного влияния. В диапазоне свыше 25...40 кГц электрическое и магнитное влияния становятся одинаковыми по величине.

Во всем диапазоне частот между индуктивной и емкостной связями одинаковых цепей существует следующее соотношение:

$$m/k = Z_b^2, \tag{1.29}$$

где Z_b — волновое сопротивление цепей.

Активные составляющие электрической и магнитной связей на низких частотах близки к нулю. С ростом частоты их роль в общей величине связи возрастает.

Так, $g_{12} \approx (0,1...0,15)\omega k$, а $r_{12} \approx (0,2...0,4)\omega m$.

Зависимость величин составляющих электромагнитной связи от частоты в реальных кабелях имеет весьма сложный характер. Это обусловлено тем, что из-за неравномерного, случайного распределения связей по длине кабеля имеет место компенсация связей одного элементарного участка связями другого участка.

Поскольку связи носят комплексный характер, то эффект компенсации связей зависит от частоты и длины линии. На рис. 1.10 для примера приведены величины составляющих электромагнитной связи при влиянии на дальний конец.

Для кабельных линий связи величины переходного затухания между цепями A_0 и A_1 при непосредственном влиянии могут быть выражены через величины электромагнитных связей в строительных длинах N_{12} и F_{12} , коэффициенты затухания цепей α_1 и α_2 и длину параллельного пробега цепей (длину участка влияния) l .

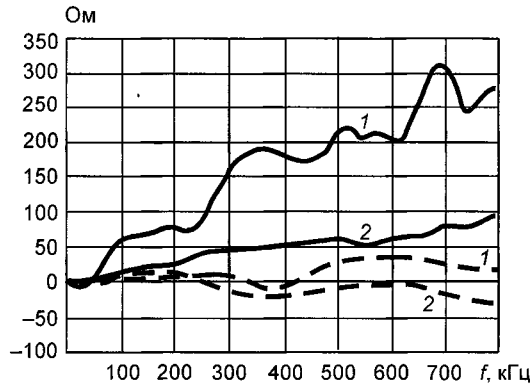


Рис. 1.10. Пример частотной зависимости активной (сплошная) и реактивной (штриховая линия) составляющих электромагнитной связи при влиянии на дальний конец:
1 — в одной строительной длине; 2 — на усилительном участке

Для строительных длин протяженностью s (при одинаковых параметрах цепей, т.е. при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $Z_{B1} = Z_{B2} = Z_B$):

$$A_{0c.d} = 20 \lg \left| \frac{2}{N_{12} Z_B} \right|; \quad (1.30)$$

$$A_{1c.d} = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12} Z_B} \right| + \alpha l. \quad (1.31)$$

Для любой длины усилительного участка кабельной линии, состоящего из n строительных длин,

$$A_{0уc.d} = A_{0c.d} + 10 \lg \left| \frac{4\alpha \cdot s}{1 - e^{-4\alpha \cdot ns}} \right|, \quad (1.32)$$

$$A_{1у,y} = A_{1c.d} + 10 \lg n + \alpha(n-1)s. \quad (1.33)$$

По формулам (1.30)–(1.33) можно определить величины переходного затухания, если известны величины коэффициентов N_{12} и F_{12} в строительных длинах. По ним можно также вычислить допустимые величины коэффициентов электромагнитных связей в строительных длинах, чтобы обеспечить заданные величины переходного затухания между цепями на кабельной линии — на длине усилительного участка.

1.7. Косвенные влияния

Рассмотренный выше переход электромагнитной энергии из цепи влияющей в цепь, подверженную влиянию, как указывалось, обусловлен наличием электромагнитных связей между этими цепями на ближнем и дальнем концах. При этом считалось, что сами цепи однородны по всей длине и имеют по концам нагрузки, равные волновым сопротивлениям цепей. Кроме того, принималось, что, помимо двух — влияющей и подверженной влиянию — цепей, нет никаких третьюх цепей, параллельно им расположенных. Влияние между цепями в этих условиях называется *непосредственным влиянием*.

Однако в реальных условиях приходится учитывать следующие факторы. Во-первых, нагрузки на концах цепей всегда несколько отличаются от волновых сопротивлений цепей. Во-вторых, цепи по длине практически не абсолютно однородны, т.е. волновые сопротивления их в различных точках по длине цепи отличаются от номинального значения. В-третьих, параллельно цепям, влияющим и подверженным влиянию, всегда есть так называемые третьи цепи, например, пикаровские, фантомные, соседние физические цепи, оболочки или экраны.

Указанные факторы могут быть причиной возникновения дополнительных путей перехода энергии из влияющей цепи в цепь, подверженную влиянию, т.е. так называемого *косвенного влияния между цепями*. При этом доля косвенного влияния может быть весьма существенной, а иногда оно может оказаться решающим, значительно превышающим величину непосредственного влияния. Особенно велика роль косвенных путей перехода энергии на дальний конец цепи, подверженной влиянию, поскольку непосредственное влияние между цепями на дальний конец весьма мало.

К наиболее существенным путям косвенного влияния, с которыми приходится считаться на практике, следует отнести:

- влияние из-за несогласованности нагрузочных сопротивлений на концах цепей;
- влияние, обусловленное неоднородностью волновых сопротивлений цепей по длине;
- влияние через третьи цепи.

Рассмотрим физическую трактовку появления этих косвенных путей влияния.

Схема косвенного влияния, обусловленного несогласованностью нагрузок на концах цепей, показана на рис. 1.11.

При распространении по цепи I полезного сигнала $I_{\text{пс}}$ от начала к концу цепи (сплошная линия) из-за непосредственного влияния на ближний конец к началу цепи II, подверженной влиянию, поступит ток помех. Если сопро-

тивление нагрузки $Z_{\text{нн}2}$ в начале цепи II не равно волновому сопротивлению $Z_{\text{в}2}$ этой цепи, то часть тока помех отразится и направится к концу цепи II (штриховая линия 1). Кроме того, если сопротивление нагрузки в конце $Z_{\text{нн}1}$ цепи I не равно волновому сопротивлению $Z_{\text{в}1}$ этой цепи, то часть тока $I_{\text{ос}}$ полезного сигнала, отразившись от конца цепи I, направится к началу данной цепи, создавая при этом влияние на цепь II, обусловленное электромагнитными связями между цепями на ближнем конце, и ток помех, возникающий в результате этого в цепи II, будет поступать также к концу цепи II (штриховая линия 2). Таким образом, токи помех по путям 1 и 2 поступают в нагрузку $Z_{\text{нн}2}$ и суммируются.

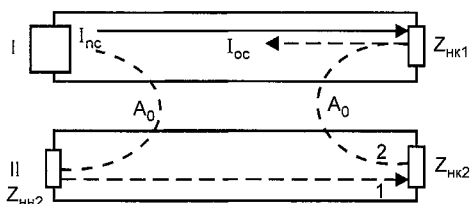


Рис. 1.11. Схема косвенного влияния между цепями из-за несогласованности нагрузок

Чтобы исключить или уменьшить до допустимых пределов токи помех по этим косвенным путям влияния, нагрузочные сопротивления на концах цепей должны быть равны или весьма близки к волновым сопротивлениям цепей. Влияния между цепями по указанным путям будут также тем меньше, чем больше переходное затухание между этими цепями на ближнем конце.

Косвенное влияние через третьи цепи схематически показано на рис. 1.12.

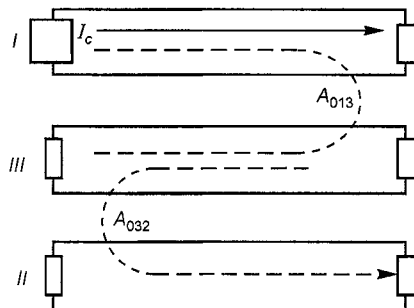


Рис. 1.12. Схема косвенного влияния через третьи цепи

Под цепями III имеют в виду любые цепи, параллельные цепям I и II, например, пикаровские и фантомные цепи, экраны и оболочки кабелей, все физические жилы в кабеле.

При распространении полезного сигнала по влияющей цепи I вследствие электромагнитных связей между цепями I и III в цепи III будут наводиться токи помех, направляющиеся к ее ближнему концу, т.е. к началу цепи III. Эти токи, проходящие по цепи III, вследствие электромагнитных связей между цепями III и II будут создавать переходные токи в цепи II, которые направляются к концу данной цепи и создают в нагрузке на конце цепи II токи помех.

Влияние между цепями I и II на дальний конец цепи II по этому косвенному пути будет тем меньше, чем больше величины переходного затухания на ближнем конце между цепями I, III (A_{013}) и III, II (A_{032}).

Косвенное влияние из-за неоднородностей волновых сопротивлений цепей схематически показано на рис. 1.13.

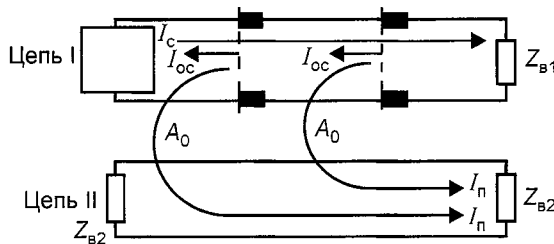


Рис. 1.13. Схема косвенного влияния между цепями из-за неоднородности волнового сопротивления влияющей цепи:
 I_n — переходный ток; I_c — ток сигнала

При распространении сигнала по цепи I (сплошная линия) в местах изменения волнового сопротивления в цепи I он будет отражаться. Отраженная часть тока указанного сигнала (штриховая) будет направляться к началу цепи I, создавая при этом в цепи II переходные токи помех, направляющиеся к дальнему концу данной цепи.

Токи помех в конце цепи II по этому косвенному пути будут тем меньше, чем однороднее цепь I, т.е. чем меньше мест и чем меньше величины изменения волнового сопротивления по длине цепи I, а также чем выше величина переходного затухания на ближнем конце между цепями, влияющей и подверженной влиянию.

В практике строительства линий связи принимаются меры по ограничению перехода энергии по косвенным путям. Основными мерами являются согласования волновых сопротивлений цепей и входных сопротивлений оборудования. Кроме того, повышают однородности цепей на всем протяжении усилительного участка за счет нормирования величины волнового сопротивления строительных длин (нормируются величины рабочих емкостей цепей) и группирования строительных длин при прокладке кабелей (чтобы цепи смежных строительных длин возможно меньше отличались величинами волновых сопротивлений или рабочих емкостей).

Раздел 2

МЕСТО СТРУКТУРИРОВАННОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА СЕТЯХ ЕСЭ РОССИИ

Глава 2. Основные положения структурированных кабельных систем

2.1. Общие положения

Структурированная кабельная система (СКС) как элемент информационного пространства представляет собой неотъемлемую часть любого современного общественного здания, а ее отсутствие снижает рыночную стоимость его как объекта недвижимости.

СКС ориентированы в первую очередь на офисные здания или их часть, основная площадь которых предназначена для организации рабочих мест, оборудованных современными информационными системами [29].

Для таких систем разработаны следующие стандарты:

- Международный ISO/IEC 11801 «Информационные технологии. Универсальная кабельная система для зданий и территории Заказчика»;
- Европейский EN 50173 «Информационные технологии. Общие кабельные системы»;
- Американский ANSI «Телекоммуникационное каблирование коммерческих зданий»
TIA/EIA-568-B.1 (часть I);
TIA/EIA-568-B.2 (часть II);
TIA/EIA-568-B.3 (часть III).

На базе СКС создаются локальные вычислительные сети (ЛВС).

Применение СКС позволяет:

- при относительно высоких начальных вложениях обеспечить существенную экономию полных затрат за счет длительного срока эксплуатации и низких эксплуатационных расходов;

- обеспечить надежность кабельной системы;
- менять конфигурацию и наращивать комплекс информационно-вычислительных систем офисного здания без влияния на существующую проводку;
- одновременно использовать различные сетевые протоколы и сетевые архитектуры в одной системе;
- устранить путаницу проводов в кабельных трассах;
- создать единую службу эксплуатации;
- обеспечить средой передачи информации основную массу действующего и перспективного сетевого оборудования различных классов за счет наличия стандартизованного интерфейса;
- обеспечить быструю локализацию неисправностей, восстановление связи или переход на резервирование линии за счет модульного принципа построения.

Строительство и развитие СКС осуществляется в соответствии с американским стандартом TIA/EIA-568 и его аналогом Международным стандартом ISO/IEC 11801, а также Европейским EN 50173.

В состав СКС входит оборудование (по терминологии СКС — Приложения), кабели и разъемы.

Перечисленными стандартами определены виды по терминологии СКС — Приложений (оборудования), которые могут обмениваться данными по тракту передачи СКС. Предусмотрено четыре класса линий и приложений *A, B, C* и *D* (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Классификация СКС

Класс линий	Область применения
A	Телефонные каналы цифровой системы передачи (ЦСП) и низкочастотный обмен данными. Максимальная частота сигнала — 100 кГц
B	Устройства ЦСП со средней скоростью обмена данными. Максимальная частота сигнала — 1 МГц
C	Устройства с высокой скоростью обмена. Максимальная частота сигнала — 16 МГц
D	Устройства с очень высокой скоростью обмена. Максимальная частота сигнала — 100 МГц

Классификация кабелей применительно к классам приложений по ISO/IEC 11801 приведена в табл. 2.2. Здесь принята терминология «категория кабелей».

Таблица 2.2. Стандарты СКС

ТИА/EIA-562-A	ISO/IEC 11801	EN 50173	ISO/IEC 11801
Кабели и соединители			Приложения
–	–	–	A
–	–	–	B
Категория 3	Категория 3	Категория 3	C
Категория 4	Категория 4	–	–
Категория 5	Категория 5	Категория 5	D
–	Категория 6	–	E
–	Категория 7	–	F

В настоящее время для строительства внутриобъектовых локальных сетей нашло широкое применение оборудование (Приложение) классов *C* и *D*. Для указанных объектов применяются кабели и разъемы категорий 3, 5 и 5е соответственно (табл. 2.3).

Получает развитие СКС классов *E* и *F* (кабели категорий 6 и 7).

Таблица 2.3. Область применения кабелей СКС

Категория кабеля и разъема	Максимальная частота сигнала, МГц	Область применения
3	до 16	ЛВС, низкочастотные телефонные каналы
5, 5е	до 100	ЛВС со скоростью передачи до 100 Мбит/с
6	до 250	ЛВС со скоростью передачи до 155 Мбит/с
7	до 600	ЛВС со скоростью передачи до 1000 Мбит/с

2.2. Структура СКС

В основу любой структурированной кабельной системы положена древовидная топология. Обобщенная структурная схема СКС изображена на рис. 2.1. Узлами структуры являются технические помещения (кроссовые и аппаратные), которые соединяются друг с другом и с рабочими местами электрическими или оптическими кабелями.

Все кабели, входящие в технические помещения, обязательно заводятся на коммутационное оборудование, на котором осуществляются переключения в процессе текущей эксплуатации кабельной системы. Это обеспечивает гибкость СКС, возможность легкой переконфигурации и адаптируемости под конкретные приложения.

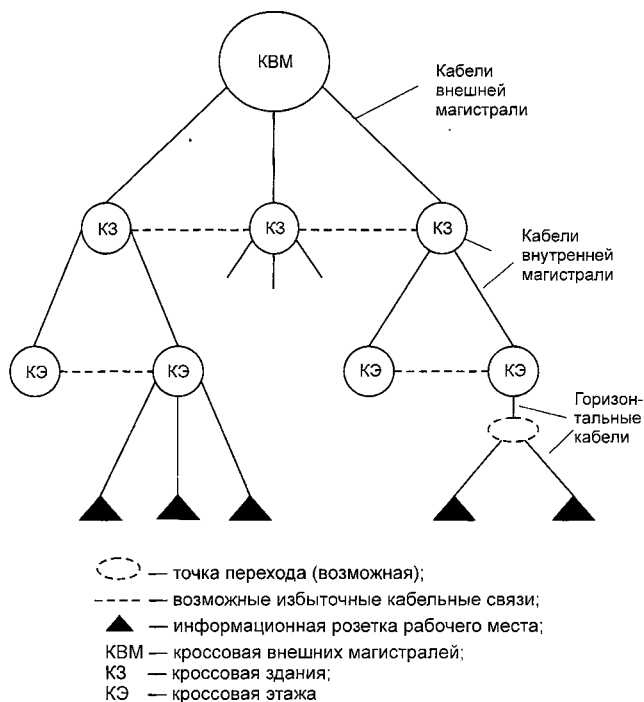


Рис. 2.1. Структурная схема СКС

Для построения СКС и информационной системы предприятия необходимы технические помещения двух видов: аппаратные и кроссовые.

Аппаратная служит для размещения сетевого оборудования коллективного пользования (АТС, серверы, концентраторы).

Кроссовая представляет собой помещение, в котором размещается коммутационное оборудование СКС, сетевое и другое вспомогательное оборудование.

Аппаратная может быть совмещена с кроссовым зданием (помещением). В этом случае его сетевое оборудование может подключаться непосредственно к коммутационному оборудованию СКС.

Если аппаратная расположена отдельно, то ее сетевое оборудование подключается к локально расположенному коммутационному оборудованию или к обычным информационным розеткам рабочих мест.

В кроссовую внешних магистралей (КВМ) сходятся кабели внешней магистрали, подключающие к ней КЗ. В кроссовое помещение заводятся внутренние магистральные кабели, подключающие к ним кроссовые этажей (КЭ).

В свою очередь к КЭ, горизонтальными кабелями подключены информационные розетки рабочих мест.

Во всей СКС может быть только одна КВМ, и в каждом здании может присутствовать не более одной КЗ. Допускается объединение КВМ с КЗ, если они расположены в одном здании.

Подсистемы СКС. В общем случае СКС включает три подсистемы (рис. 2.2).

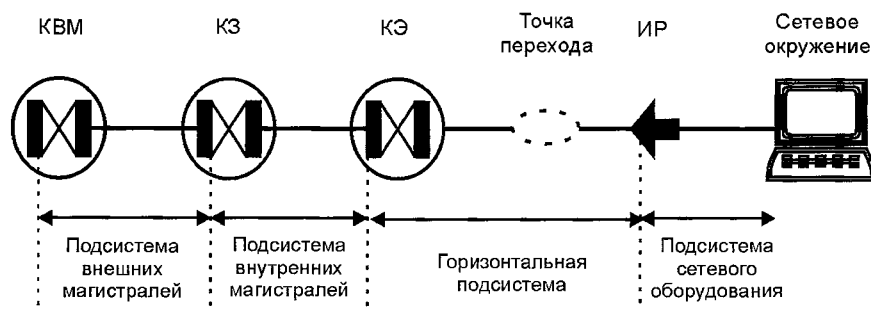


Рис. 2.2. Подсистемы СКС:
ИР — информационная розетка

Подсистема внешних магистралей (справочная подсистема) состоит из внешних магистральных кабелей между КВМ и КЗ, коммутационного оборудования в КВМ и КЗ, к которому подключаются внешние магистральные кабели, и коммутационных шнуров и/или перемычек в КВМ. Подсистема внешних магистралей служит основой для построения сети связи между компактно расположенными на одной территории зданиями (campus). Если СКС устанавливаются автономно только в одном здании, то подсистема внешних магистралей отсутствует.

Подсистема внутренних магистралей (вертикальная или вторичная подсистема) содержит проложенные между КЗ и КЭ внутренние магистральные кабели, подключенное к ним коммутационное оборудование в КЗ и КЭ, а также коммутационные шнуры и/или перемычки в КЗ. Кабели рассматриваемой подсистемы фактически связывают между собой отдельные этажи здания и/или пространственно разнесенные помещения в пределах одного здания. Если СКС обслуживает один этаж, то подсистема внутренних магистралей может отсутствовать.

Горизонтальная (третичная) подсистема образована внутренними горизонтальными кабелями между КЭ и информационными розетками рабочих мест, самими информационными розетками, коммутационным оборудовани-

ем в КЭ, к которому подключаются горизонтальные кабели, и/или перемычками в КЭ.

Принципиальной особенностью СКС является то, что коммутация в ней, в отличие от АТС и сетевого компьютерного оборудования, всегда производится вручную коммутационными шнурами и/или перемычками.

Наиболее важным следствием такого подхода является то, что функционирование СКС принципиально не зависит от состояния электропитающей сети. Введение в состав СКС элемента электронной или электромеханической коммутации влечет за собой обязательное использование в оборудовании штатного источника электропитания.

Глава 3. Электрические характеристики кабелей СКС

3.1. Первичные и вторичные параметры передачи кабеля СКС

Специфика организации сетей СКС, оборудование (Приложение), диапазон использования, особенность зарубежной терминологии диктуют необходимость уточнения и идентификации положений в области определения основных электрических характеристик кабелей и элементов.

Как известно, среда передачи (кабельные линии) характеризуется первичными и вторичными параметрами передачи.

Первичные параметры (R, L, C, G) определяются в соответствии с классической терминологией. Отличительная особенность кабелей СКС — протяженность строительных длин. В соответствии с требованиями СКС параметры строго регламентированы. Поэтому в технической документации (ОСТы, Технические условия) все значения параметров приведены к заданной в зависимости от области использования кабеля и установленной системой построения тракта передачи.

Вторичные параметры передачи: коэффициент затухания α , волновое сопротивление цепи Z_B , как правило, совпадают с классическим определением. Однако для кабелей СКС параметр затухания определен не на 1 км, а на строительную длину.

Частотный диапазон регламентированной категории кабеля. Волновое сопротивление, или импеданс, Ом, определяется по формуле

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}. \quad (3.1)$$

На частотах свыше 1 МГц $Z_B = \sqrt{L/C} \cdot 100$, Ом.

В соответствии с действующими стандартами во всем диапазоне частот Z_B не должно отличаться более чем на ± 15 Ом.

Собственное затухание цепи α определяется как действительная часть коэффициента распространения

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L) \cdot (G + i\omega C)}. \quad (3.2)$$

Для кабелей СКС затухание цепей A , дБ, на строительной длине, это обычно 100 м, вычисляется по формуле

$$A = \alpha [дБ/100 м] \cdot L [1 м/100]. \quad (3.3)$$

В соответствии со стандартом TIA/EIA-568-A максимальное затухание $A(f)$ по длине кабеля 100 м при +20 °С, начиная с частоты 0,772 МГц, для кабелей категорий 3, 4, 5 определяется по формуле

$$A(f) = k_1\sqrt{f} + k_2\sqrt{f} + k_3\sqrt{f}, \quad (3.4)$$

где f — частота сигнала, МГц; k_1, k_2, k_3 — константы, определяемые в зависимости от категории кабеля (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Константы k_1, k_2, k_3 для кабелей категории 3, 4, 5

Категория кабеля	k_1	k_2	k_3
3	2,320	0,738	0,000
4	2,050	0,043	0,057
5	1,967	0,023	0,050

3.2. Взаимные влияния между цепями кабелей СКС

Параметры взаимных влияний между цепями СКС в основном соответствуют классическим определениям, однако учтены терминологические особенности стандартов ISO/IEC 11801 и TIA/EIA-568-A.

Согласно [1] разность между уровнями передаваемого сигнала и создаваемой им помехи на соседней паре называется *переходным затуханием*.

Если источник сигнала и точка измерения находятся на одном конце, то говорят о переходном затухании на ближнем (*NEXT*), если на дальнем — то о переходном затухании на дальнем (*FEXT*) концах.

В технике СКС термины (Near End Cross-Talk, *NEXT*), (Far End Cross-Talk, *FEXT*) заимствованы из английской технической литературы. В нашей терминологии это соответствует обозначениям A_0 и A_1 (рис. 3.1).

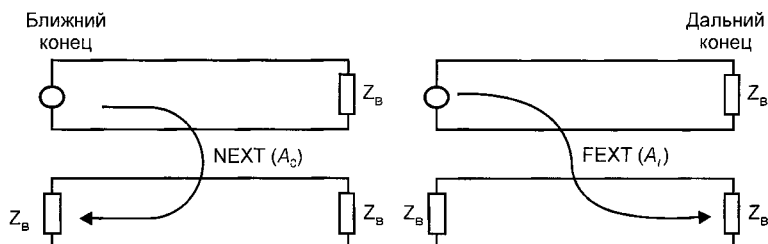


Рис. 3.1. Иллюстрация к определению *NEXT* и *FEXT*

В соответствии со стандартом ТИА/EIA-568-A минимальное значение переходного затухания на ближнем конце между цепями кабеля СКС на строительной длине 100 м на частотах свыше 0,772 МГц нормируется по формуле

$$NEXT(f) = NEXT(0,772) - 15 \lg(f/0,772), \quad (3.5)$$

где $NEXT(0,772)$ — минимально допустимое переходное затухание на ближнем конце на частоте 0,772 МГц, которое для кабелей категорий 3, 4, 5 принимается 43, 58 и 64 дБ соответственно; f — частота сигнала, МГц.

При воздействии нескольких цепей СКС на одну рассчитывается суммарная мощность помехи от n цепей по результатам измерений $NEXT$:

$$PS - NEXT = 10 \lg \sum_{i=1}^{n-1} 10^{\frac{-NEXT_i}{10}}, \quad (3.6)$$

где $NEXT_i$ — величина $NEXT$ для i -й пары; PS — суммарная плотность; n — количество пар в кабеле.

Воздействие внешнего сигнала на дальний конец оценивается по формуле

$$FEXT = P_c - \max P_{\text{шнд}}, \quad (3.7)$$

где $P_{\text{шнд}}$ — уровень помехи на дальнем конце; P_c — уровень полезного сигнала.

При воздействии n цепей суммарная переходная помеха на дальнем конце определяется по формуле

$$PS - FEXT = 10 \lg \sum_{i=1}^{n-1} 10^{\frac{-FEXT_i}{10}}. \quad (3.8)$$

Переходная помеха на дальнем конце оказывается обычно меньше по сравнению с переходной помехой на ближнем. Однако она суммируется синфазно, что может увеличить их мощность.

Это концепция излагаемая в теории СКС.

3.3. Защищенность в цепях кабелей СКС

Для оценки качества информации в технике проводной связи широко используется параметр защищенности от помех, или защищенность, которая представляет собой разность между уровнями полезного сигнала и помехи в рассматриваемой точке

$$\alpha_3 = P_c - P_{\text{п}}. \quad (3.9)$$

Рис. 3.2 иллюстрирует определение α_3 на ближнем конце цепи 2, подверженной влиянию, при встречной передаче сигнала.

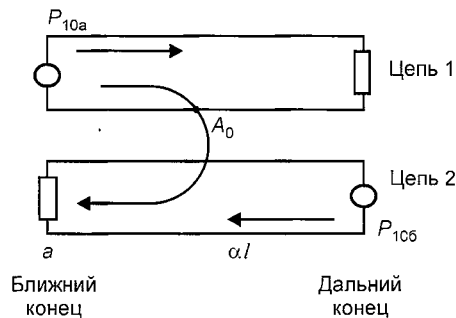


Рис. 3.2. К определению параметров влияния:
 P_{10a} , P_{106} — уровни передатчика на ближнем и дальнем концах цепей 1 и 2

Вычислим защищенность в точке «а» на ближнем конце цепи, подверженной влиянию. Сигнал, прошедший в цепи 2 в точку «а»,

$$P_{c2} = P_{106} - al, \quad (3.10)$$

где al — затухание цепи.

Переходная помета из цепи 1 в цепь 2 на ближнем конце (точка «а») описывается выражением

$$P_{п} = P_{10a} - A_0. \quad (3.11)$$

Тогда защищенность в точке «а» цепи 2 представляется в виде

$$A_з = P_{c2} - P_{п2} = P_{106} - al - (P_{10a} - A_0) = A_0 - al. \quad (3.12)$$

Используя терминологию СКС, представим защищенность от переходной помехи

$$ACR = NEXT - A. \quad (3.13)$$

Как следует из приведенного выражения, ACR зависит только от величины затухания цепи (A) и переходного затухания на ближнем конце между влияющей и подверженной влиянию цепями.

Тракты СКС и использующие их приемопередатчики сетевой аппаратуры различного назначения построены таким образом, что другие виды помех пренебрежительно малы.

Чтобы отличить от понимания и методов оценки защищенности в любой точке трактов передачи линий связи, где учитывается и другие источники помех, в структурах СКС принята аббревиатура ACR (Attenuation to Cross-Talk Ratio), т.е. защищенность от переходных помех источника, расположенного в сердечнике кабеля с «витыми» парами.

Согласно стандарту ISO/IEC 11801 параметр ACR определяет величину превышения помехи полезным сигналом и поэтому является интегральной характеристикой качества как самого кабеля из витых пар, так и любого

тракта передачи на его основе. По мере увеличения ACR при прочих равных условиях начинает возрастать отношение сигнал/шум и соответственно растет устойчивость связи. $NEXT$ и A зависят от частоты, причем с ростом частоты их модули меняются в противоположном направлении. Поэтому на основании формулы (3.13) параметр ACR также является частотнозависимым. Крутизна частотной характеристики параметра ACR для кабелей категории 5 составляет 20...30 дБ на декаду. Указанный стандарт регламентирует минимально допустимое значение ACR для кабелей категории 5 на частотах 20 МГц и выше.

Кабели обеспечивают устойчивую работу, если минимальное значение параметра ACR составляет 10 дБ.

Для высокоскоростных СКС, которые в процессе работы используют для передачи информации все витые пары и одновременно в двух направлениях, нормирование величины $NEXT$ оказывается недостаточным.

Для расчета помеховой составляющей, создаваемой наводками на дальнем конце, используется аналогичная величина

$$ELFEXT = FEXT - A, \quad (3.14)$$

где $ELFEXT$ (Equal Level for Far End Cross-Talk) — эквивалентный уровень переходного затухания на дальнем конце.

Необходимость учета особенностей функционирования интерфейсов сверхвысокоскоростных ЛВС приводит к использованию моделей суммарной мощности и, соответственно, нормирование параметров:

$$PS - ACR = PS - NEXT - A, \quad (3.15)$$

$$PS - ELFEXT = PS - FEXT - A. \quad (3.16)$$

3.4. Относительная скорость распространения и задержка прохождения сигналов

Параметр NVP (Nominal Velocity of Propagation) служит мерой замедления скорости распространения электромагнитных волн вдоль «витой» пары. Численно равен отношению фактической скорости распространения к скорости света в вакууме и выражается в процентах или в виде десятичной дроби. В последнем случае иногда добавляется индекс «с», т.е. 65%, 0,65 или 0,65с. Иногда для его обозначения применяется также сокращение VOP (Velocity of Propagation).

Необходимость учета NVP связана с тем, что конечная скорость распространения приводит к появлению довольно значительной задержки прохож-

дения сигналов, что может оказаться критичным для некоторых приложений, например для сетей Fast Ethernet.

Нормативно-технические документы СКС задают общие требования к величине *NVP* (табл. 3.2). Порядок измерения этого параметра впервые конкретно определен в стандарте ISO/IEC 11801 в редакции 2000 г.

Таблица 3.2. Общие требования к *NVP*

Частота, МГц	<i>NVP</i>		
	Категория 3	Категория 4	Категория 5
1,0	0,4	0,6	0,65
10,00	0,6	0,6	0,65
100,00	–	–	0,65

Величина *NVP* «витой» пары в общем случае зависит от диаметра проводников, расстояния между ними и типа диэлектрика. Для кабелей, применяемых в СКС, ключевым фактором считается материал изоляции. Диаметр проводников и толщина изоляционного покрова достаточно жестко заданы стандартом, а для получения необходимого уровня *NEXT* проводники плотно свиты друг с другом. Так, для проводников с полиэтиленовой изоляцией на частотах свыше 10 МГц параметр *NVP* соответствует 0,65...0,70, с изоляцией из тефлона — 0,69...0,73, а применение поливинилхлоридных материалов уменьшает его значение до 0,60...0,64. При типичном значении *NVP* в диапазоне 60...75% для участка линии 100 м время прохождения сигнала составляет 370...550 мс.

Значение *NVP* меняется в зависимости от состояния изоляции жил кабелей и температуры окружающей среды не более чем на 3% номинального значения. Конечная скорость распространения электромагнитной волны по витой паре вызывает также задержку поступления сигнала на приемник после его подачи на вход линии. Для современных высокоскоростных сетевых интерфейсов абсолютная величина такой задержки оказывается достаточно заметной даже при тех относительно коротких трассах, которые характерны для горизонтальных подсистем СКС. Величина задержки (*delay*) является критичной для некоторых приложений, активные устройства которых использует кабельные трассы как моноканал в процессе реализации информационного обмена. К ним относятся разновидности Ethernet при работе в полудуплексном режиме.

Значение задержки прямо связано с параметром *NVP* и является частотно-зависимой величиной.

Согласно стандарту ISO/IEC 11801 в редакции 2000 г. задержка прохождения сигнала не должна превышать параметр $\text{delay} = 534 + 36/f$ нс/100 м в диапазоне частот от 1 МГц до верхней граничной частоты в кабеле.

3.5. Структурные и возвратные потери

В предыдущих разделах рассматривалась идеальная однородная линия, в которой сигнал не испытывал отражений. Реальные линии имеют неоднородности по сопротивлению. Источниками неоднородностей могут служить производственные и эксплуатационные дефекты кабеля, разъемные соединители и оконечные нагрузки с сопротивлением, отличным от волнового. Электромагнитная волна, встречая такие неоднородности в процессе распространения по цепи кабеля, частично отражается от них и возвращается к началу. При наличии нескольких неоднородностей волна претерпевает серию отражений. Результатом является возникновение в цепи двух дополнительных потоков энергии: *обратного*, состоящего из суммы отраженных волн, и *попутного*, возникающего в результате двойных отражений (рис. 3.3).

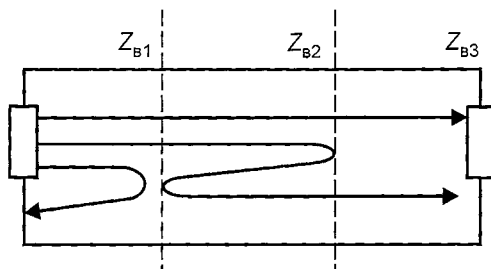


Рис. 3.3. Возникновение обратного и попутного потоков энергии

Обратный поток приводит к колебаниям входного сопротивления. Это затрудняет согласование с аппаратурой на концах линии, что сопровождается ростом рабочего затухания и приводит к искажениям передаваемого сигнала. Попутный поток искажает форму передаваемого сигнала, а также создает помехи передачи.

Интенсивность обратного отражения электромагнитных волн в местах неоднородности волнового сопротивления характеризуется параметром *SRL* (Structural Return Loss), который определяется как отношение мощности основного сигнала к мощности обратного потока энергии. Чем выше значение *SRL*, тем меньшую мощность имеет обратный и соответственно попутный потоки энергии, и тем более качественным считается кабель.

Параметр *SRL* из-за своей малости нормируется в логарифмических единицах и в нормативно-технических документах указывается на длину кабеля 100 м. Стандарты ISO/IEC 11801 и TIA/EIA-568-A задают практически одинаковые значения параметра *SRL* для всех категорий кабеля с волновым сопротивлением 100 и 120 Ом (табл. 3.3).

Таблица 3.3. Параметры *SRL* кабелей категорий 3, 4, 5

Частота, МГц	Категория 3		Категория 4		Категория 5	
	TIA/EIA-568-A	ISO/IEC 11801	TIA/EIA-568-A	ISO/IEC 11801	TIA/EIA-568-A	ISO/IEC 11801
1–10	12	12	21	21	23	23
10–16	$12 - 10 \lg(f/10)$	10	$21 - 10 \lg(f/10)$	19	23	23
16–20	–	–	$21 - 10 \lg(f/10)$	18	23	23
20–100	–	–	–	–	$23 - 10 \lg(f/20)$	$23 - 10 \lg(f/20)$

3.6. Анализ и сравнительная оценка терминов теории электросвязи и СКС

В процессе написания книги авторами проанализированы и проработаны различные источники по структурированным кабельным системам, учтены термины, используемые в области СКС, а также особенности элементов конструкций кабелей и их электрические характеристики. Были приняты во внимание статьи, опубликованные в отечественных журналах «Электросвязь», «Вестник связи», «Сети и системы связи», «Технологии и средства связи». Кроме того, были проанализированы: американский TIA/EIA-568-A, Международный ISO/IEC 11801, Европейский EN 50173 стандарты. В результате было принято решение изложить собственную точку зрения, базирующуюся на классических представлениях. К намерению сделать комментарии и разъяснения по этому вопросу авторов подтолкнула статья С.А. Попова «СКС в России. Что нового?» («Вестник связи». № 5. 2003). В заключительной части статьи сказано, что «...в деле становления терминологии в сфере СКС, которая, к сожалению, в период внедрения в стране структурированного каблирования оторвалась от отечественной телекоммуникационной терминологии и была засорена кальками с английских терминов, к тому же не всегда технически грамотными».

Итак, комментарии и разъяснения.

Первичные и вторичные параметры передачи и влияния кабелей и СКС определены требованиями стандартов TIA/EIA-568-A.

Электрические характеристики кабелей СКС представлены требованиями этих же стандартов.

Первичные параметры передачи кабелей СКС: активное сопротивление, рабочая емкость, индуктивность, сопротивление изоляции жил совпадают с принятыми определениями для кабелей связи и комментариев не требуется. Вторичные параметры передачи кабелей СКС: коэффициент распространения, коэффициент затухания и фазы, волновое сопротивление цепей также имеют единую терминологию с кабелями электросвязи. Определения параметров влияния в кабелях имеют некоторое различие. В табл. 3.4 приведены особенности терминологии.

Таблица 3.4. Отличия терминов СКС и сетей электросвязи

Параметры влияния		
<i>NEXT</i> (Near End Cross-Talk) — двунаправленные наводки — сигнал в одной паре проводников при наличии сигнала в другой паре при разнонаправленной передаче, дБ. Нормирование минимального значения <i>NEXT</i> при длине кабеля 100 м. Пересчеты на длину недопустимы	A_0 — переходное затухание между цепями линий при влиянии на ближний конец, дБ равно 10 десятичным логарифмам модуля отношения мощности передаваемого сигнала в начале влияющей цепи $P_{1н}$ к мощности помехи $P_{2н}$, в начале цепи подверженной влиянию: $A_0 = 10\lg P_{1н}/P_{2н} $; A_0 — определяется для любой длины без пересчета	Термины частично отличаются
<i>FEXT</i> (Far End Cross-Talk) однонаправленные наводки. Сигнал, наводимый на одной паре проводников из другой пары при однонаправленной передаче; измеряется как отношение уровня сигнала в активной витой паре к уровню паведенного сигнала в контрольной паре на входе приемника, дБ	A_1 (A_g) — переходное затухание между цепями линий при влиянии на дальний конц, дБ, равно 10 десятичным логарифмам модуля мощности передаваемого сигнала в начале влияющей цепи $P_{1н}$ к мощности помехи $P_{2н}$ в начале цепи, подверженной влиянию: $A_1 = 10\lg P_{1н}/P_{2н} $	Термины частично отличаются
<i>ACR</i> (Attenuation Cross-Talk Ratio) — отношение затухания к двунаправленным (перекрестным) наводкам. Величина, характеризующая качество двунаправленной передачи сигналов по двум витым парам, дБ. Характеризует защищенность отношения сигнал/помеха на ближнем конце при встречной передаче сигналов $ACR = NEXT - A$	Для кабелей связи при встречной передаче цифровых сигналов нормируется переходное затухание на ближнем конце A_0 . Защищенность $\alpha_s = P_c - P_n$ должна обеспечить заданную верность передачи (10^{-9}) в любой точке и ее величина не зависит от затухания линии	Термины отличаются

Продолжение таблицы 3.4

Параметры влияния		
<i>PS-NEXT</i> (Power-NEXT) — суммарные двунаправленные наводки. Характеризуют качество двунаправленной передачи в одной паре при наличии сигналов во всех остальных парах	Оценка «суммарной наводки» отсутствует. Необходимую верность передачи в цепи при влиянии n цепей обеспечивает увеличенное A_0 , на $10 \lg N$	Термины отличаются
<i>ELFEXT</i> (Equal Far End Cross-Talk) — отношение затухания к однонаправленным наводкам; характеризует превышение уровня сигнала над уровнем наводок; позволяет оценить качество сигналов при однонаправленной передаче по всем витым парам, дБ		В системе связи этот параметр не используется
<i>SRL</i> (Structural Return Loss) — возвратные потери. Характеризуют отношение мощности отраженного сигнала к мощности сигнала на входе линии, дБ	Термин «возвратные» потери в системах связи не используется. Нормируется коэффициент отражения p , учитывающий различие волновых сопротивлений на стыках строительных длин, а следовательно, увеличение рабочего затухания	Термины отличаются

Таким образом, в приведенной таблице в концентрированном виде приведены наши «разночтения» в терминологии разработчиков СКС и «классических» связистов.

Следует отметить путаницу в определениях терминов и их физической трактовке.

Так, в СКС термин *ACR* (защищенность) определяется однозначно для ближнего конца линий как разность переходного затухания *NEXT* и рабочего затухания цепи A , дБ, и естественно в таком представлении *ACR* — частотно-зависимая величина.

ACR представляет собой критерий моночастотной оценки взаимных влияний между цепями линии в диапазоне частот, использующем оборудование СКС.

Пригодность линий для передачи сигналов по цепям кабеля определяется минимальным значением *ACR*.

Определяющим моментом является «маска» *ACR*.

По нашему мнению, такой подход определен из того, что в основу кодов оборудования СКС приняты только прямоугольные импульсы.

Для линий связи подобный метод оценки параметров влияния в диапазоне частот применяется для аналоговых систем передачи с частотным делением каналов.

Для цифровых систем электросвязи, применяемых на сетях ЕСЭ РФ, принят иной подход.

В ансамбле цепей дискретной и аналоговой информации учитывается критерий электромагнитной совместимости по достоверности передачи.

Стандарты нормирования параметров качества каналов разработаны Международным союзом телекоммуникаций, сектор стандартизации электросвязи (ITU-T). К основным показателям качества цифровых систем передачи и коммутации относятся ошибки и готовность канала.

Нормы на характеристики ошибок содержатся в Рекомендациях G.821 и G.826.

Количество ошибок зависит от величины защищенности a_3 сигнал/помеха, которая для различных кодов различна.

В материалах настоящей книги приведены значения a_3 для кодов 2B1Q, CAP, TC-PM, DMT, обеспечивающие достоверность передачи 10^{-9} .

Поэтому для систем электросвязи основным параметром является защищенность $a_3 = P_c - P_{\text{пом}}$, установленная экспериментально для указанных кодов. Физической величиной, обеспечивающей заданную достоверность передачи, являются *параметры взаимных влияний между цепями: переходное затухание на ближнем конце $A_0 = P_{10} - P_{20}$, переходное затухание (защищенность) на дальнем конце $A_3 = P_{11} - P_{21}$.*

Следует отметить и такие разночтения в терминологии.

1. Коротко: «*PS-NEXT* — суммарные двунаправленные наводки».

В каких единицах оценивается данный параметр?

PS — суммарная мощность, дБ? Вт?

NEXT — переходное затухание, дБ.

Аналогично $PS - ELFEXT = PS - FEXT - A_0$. Давайте скажем проще: напряжение переходной помехи при влиянии ансамбля цепей на ближний и дальний концы.

2. Структурные возвратные потери (*SRL*).

А может быть проще — коэффициент отражения? И другие «кальки» электрических параметров СКС.

Итак, настало время «единения» терминологий.

Авторы предлагают перейти к «классическому» пониманию и использованию терминов и определений, имея в виду ту область применения кабелей СКС, которой посвящена наша книга — широкополосному абонентскому доступу.

Глава 4. Основные требования к электрическим характеристикам линий и каналам СКС

Разработка универсальных кабелей, пригодных к применению в структурированных системах и сетях широкополосного доступа (СШД), потребовала проведения анализа требований к электрическим характеристикам, предъявляемым к линиям СКС и СШД и формированию обобщенных параметров, необходимых при конструировании этих кабелей. Требования к СКС подробно сформулированы и обобщены в работах А.Б. Семенова, С.К. Стрижаква, И.Р.Сунчелей «Структурированные кабельные системы» [29].

Для обеспечения функционирования сети СКС пронормированы параметры полного тракта и его элементов для различных категорий сети.

Даны электрические характеристики, не совпадающие с параметрами сетей электросвязи. Кроме того, учтена специфика сетей СКС и приведены требования к следующим параметрам:

а) относительная скорость распространения сигналов (NVP) и задержка прохождения сигналов ($delay$);

б) разброс задержек прохождения сигналов по «витым» парам ($Skew$);

в) структурные и обычные «возвратные» потери ($I(SRL)$);

г) величина затухания несимметрии (LCL);

д) параметр «защищенность» от переходной помехи на ближнем конце ACR ;

е) параметр «защищенность» от переходной помехи на дальнем конце $ELFEXT$;

ж) параметр, определяющий суммарную мощность переходной помехи от нескольких цепей.

Ряд параметров оценивается при испытании каналов и линий СКС (затухание, параметры влияния). Параметры а)–ж) гарантируются конструкцией кабелей и технологией производства.

4.1. Требования к затуханию электрических трактов передачи

При разработке универсальных кабелей необходимо учитывать эти характеристики, исключая специфичные параметры для высокоскоростных систем СКС категорий 5, 6, 7. За основу требований к затуханию кабелей принима-

ется максимально допустимое затухание тракта передачи: включающего разъем, кабель и шнур.

$$A = \sum A_{\text{разъема}} + A_{\text{кабеля на 100 м}} \cdot (L_{\text{кабеля}} + 1,2 \cdot \sum L_{\text{шнуров}}) / 100 \text{ м}, \quad (4.1)$$

где $\sum A_{\text{разъема}}$ — сумма максимально допустимых затуханий, вносимых всеми разъемами. В канале может быть до четырех разъемов, в базовой линии всегда два разъема; $A_{\text{кабеля на 100 м}}$ — максимально допустимое затухание горизонтального кабеля на длине 100 м; $L_{\text{кабеля}}$ — фактическая длина горизонтального кабеля или базовой линии; $\sum L_{\text{шнуров}}$ — фактическая сумма длин всех шнуров канала или базовой линии. Коэффициент 1,2 учитывает то обстоятельство, что в случае кабеля с витыми проводниками для оконечных и коммутационных шнуров стандартом ТИА/EIA-568-A допускается максимальное затухание на 20% выше, чем в случае горизонтального кабеля с монолитными проводниками.

В табл. 4.1 даны максимальные затухания при 20 °С в канале и базовой линии соответственно. Значения затуханий вычислялись по (4.1) при $L_{\text{кабеля}} = 90$ м и $\sum L_{\text{шнуров}} = 10$ и 4 м для канала и базовой линии соответственно.

Таблица 4.1. Величины затухания в канале и базовой линии

Частота, МГц	Затухание, дБ					
	категория 3		категория 4		категория 5	
	канал	базовая линия	канал	базовая линия	канал	базовая линия
1,00	4,2	3,2	2,6	2,2	2,5	2,1
4,00	7,3	6,1	4,8	4,3	4,5	4,0
10,00	11,5	10,0	7,5	6,8	7,0	6,3
16,00	14,9	13,2	9,9	8,8	9,2	8,2
20,00	—	—	11,0	9,9	10,3	9,2
31,25	—	—	—	—	12,8	11,5
62,50	—	—	—	—	18,5	16,7
100,00	—	—	—	—	24,0	21,6

Если температура окружающей среды во время тестирования отлична от 20 °С, то максимальные затухания из табл. 4.1 должны быть скорректированы согласно следующему выражению

$$A(t^\circ) = A_{\text{max } 20^\circ} (1 + k(t^\circ - 20^\circ)), \quad (4.2)$$

где t° — температура окружающей среды во время тестирования, °С; $A_{\text{max } 20^\circ}$ — максимальное затухание из табл. 4.1; k — температурный коэффициент затухания.

хания (для кабелей категории 3 равен 0,015, а для кабелей категорий 4 и 5 — 0,004).

Согласно документу TSB-67 измерения затухания необходимо проводить в диапазоне от 1 до 16, 20 и 100 МГц для категорий 3, 4, и 5 соответственно. Шаг смены частот не должен превышать 1 МГц. Тестируются все четыре пары. Наихудшее из четырех полученных значений сравнивается с нормами, приведенными в табл. 4.1. Из-за неизбежных ошибок измерения значения затухания менее 3 дБ с нормами не сравниваются.

Для увеличения точности и достоверности проводимых испытаний TSB-67 рекомендует измерять затухания для каждой пары и с двух сторон. При этом результаты тестирования не должны отличаться друг от друга во всем диапазоне частот более, чем на величину допустимой погрешности измерительного прибора.

4.2. Требования к переходному затуханию *NEXT* электрических трактов передачи

Минимально допустимое значение переходного затухания (*NEXT*) для канала и базовой линии рассчитывается по формуле

$$NEXT = -20 \lg \left(10^{-NEXT_{\text{кабеля}} / 20} + n \cdot 10^{-NEXT_{\text{разъема}} / 20} \right), \quad (4.3)$$

где $NEXT_{\text{кабеля}}$ — минимальное переходное затухание горизонтального кабеля на длине 100 м; $NEXT_{\text{разъема}}$ — минимальное переходное затухание разъема; n — количество разъемов на ближнем конце ($n = 2$ и 1 для канала и базовой линии соответственно).

Анализ формулы (4.3) показывает два обстоятельства. Во-первых, составители TSB-67 использовали модель суммирования по мощности помеховых составляющих, создаваемых отдельными элементами электрического тракта передачи. Во-вторых, при тестировании канала более мощную переходную помеху следует ожидать со стороны технического помещения, так как для этого случая $n = 2$, а при тестировании со стороны информационной розетки модели канала и базовой линии совпадают.

В табл. 4.2 приведены рассчитанные по (4.3) минимальные значения параметра *NEXT* для канала и базовой линии соответственно.

Измерение переходного затухания для канала и базовой линии осуществляется в диапазоне 1...16, 20 и 100 МГц для категорий 3, 4 и 5 соответственно. Шаг смены частот в диапазоне 1,0...31,25 МГц выбирается не выше 0,15 МГц; в диапазоне 31,25...100 МГц — 0,25 МГц. Тестирование производится для всех шести возможных комбинаций пар и с двух сторон.

Таблица 4.2. Минимальные значения параметра *NEXT* для канала и базовой линии

Частота, МГц	Затухание, дБ					
	категория 3		категория 4		категория 5	
	канал	базовая линия	канал	базовая линия	канал	базовая линия
1,00	39,1	40,1	53,3	54,7	60,0	60,0
4,00	29,3	30,7	43,3	45,1	50,6	51,8
10,00	22,7	24,3	36,6	38,6	44,0	45,5
16,00	19,3	21,0	33,1	35,3	40,6	42,3
20,00	–	31,4	–	–	33,7	39,0
31,25	–	–	–	–	35,7	37,6
62,50	–	–	–	–	30,6	32,7
100,00	–	–	–	–	27,1	29,3

Наихудшее из измеренных значений сопоставляется с данными из табл. 4.2 и по результатам сравнения принимается решение о соответствии канала и базовой линии нормам.

4.3. Требования к электрическим характеристикам универсального кабеля

В основу требований по затуханию и параметрам влияния универсального кабеля следует принять данные, приведенные в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Электрические нормы строительных длин универсального кабеля

Параметр	Частота тока, кГц	Норма	Коэффициент при пересчете нормы на другую длину
Электрическое сопротивление токопроводящей жилы постоянному току, пересчитанное на 1 км длины и 20 °С, Ом, для диаметров жилы, мм: 0,50 0,64 0,90	Постоянный ток	90 ^{+5,9} _{-6,0} 55±3 28,4±3	$L^*/1000$
Электрическое сопротивление изоляции токопроводящих жил, пересчитанное на 1 км длины, МОм, не менее	То же	5000	1000/L

Продолжение таблицы 4.3

Параметр	Частота тока, кГц	Норма	Коэффициент при пересчете нормы на другую длину
Рабочая емкость, пересчитанная на 1 км длины, нФ	0,8 или 1,0	45±5	$L/1000$
Омическая асимметрия жил в паре, не более, %	Постоянный ток	1,0	$L/1000$
Переходное затухание между цепями внутри пучка на ближнем конце, дБ, не менее – на частоте 160 кГц 100% комбинаций 60% комбинаций – на частоте 1024 кГц 90% комбинаций 60% комбинаций	То же	65 75 60 65	
Испытательное напряжение в течении 1 мин, В – приложенное между жилами рабочих пар – между жилами и экраном	0,05 Постоянный ток	1000 1500	
Электрическое сопротивление изоляции и наружной оболочки, пересчитанное на 1 км, МОм, не менее	Постоянный ток	5,0	$1000/L$
Электрическое сопротивление экрана, пересчитанное на 1 км длины и 20 °С, Ом, не более	То же	15	$L/1000$
* L — фактическая длина кабеля, м.			

Универсальный кабель СКС-КЩД будет изготавливаться на одном и том же технологическом оборудовании, что и кабели СКС.

Глава 5. Основные характеристики оборудования СКС

5.1. Общие положения

Требования к электрическим характеристикам кабелей СКС определены с учетом параметров кодов, применяемых в оборудовании в соответствии со стандартами TIA/EIA-568, ISO/IEC 11801, EN 50173.

В СКС применяются различные виды кодирования: «манчестерский», NRZ-1 + 4B5B, MLT-3 + 4B5B, 8B6T, MLT-3 + 4B5T, PAM-5.

Общим в указанных кодах является то, что в линию передаются комбинации прямоугольных импульсов, содержащих информацию. В [29] подробно описаны коды, применяемые для сетей СКС с медными жилами. Коротко прокомментируем основные характеристики кодов.

Произвольная цифровая информационная посылка образована последовательностью отдельных битов. Каждый такой бит представляется в сетевом устройстве прямоугольным импульсом длительностью $T_{и}/2$, где $T_{и}$ — длительность тактового интервала. Амплитуда импульса в соответствии с принципами цифрового представления сигнала может принимать только одно из двух фиксированных значений: логический 0 кодируется, например, положительным напряжением сигнала, а логическая 1 — его отсутствием. Передача таких элементарных посылок через канал связи выполняется последовательно с тактовой частотой $f_{т} = 1/T_{и}$.

Такой способ передачи сигнала называется *кодированием без возврата к нулю*, или кодированием NRZ (Non Return to Zero). Однако этот код не оптимален, поэтому в состав схем передатчика вводится кодер, в функции которого входит предварительное преобразование сигнала (дополнение к исходной информации последовательности новых импульсов, изменение полярности и длительности исходных посылок). За счет этого линейный сигнал лучше адаптирован к условиям передачи в линию связи. Форма импульса кодером не меняется и остается прямоугольной.

Аппаратура, работающая по электрическим трактам СКС, использует для организации информационного обмена цифровые сигналы. Большинство параметров тракта передачи электрических подсистем СКС традиционно для кабельной техники нормируются в частотной области, т.е. значения, например, затухания и переходного затухания указываются на определенной частоте.

Для выполнения различного рода инженерных расчетов и оценки возможности использования трактов СКС сетевой аппаратуры различного назначения необходим эффективный механизм, позволяющий однозначно связать между собой скорость передачи информации, тактовую частоту линейного сигнала и требуемую ширину полосы пропускания тракта.

Рассмотрим коды, применяемые в трактах СКС, более подробно. На рис. 5.1 приведены графические изображения некоторых видов линейных сигналов исходного цифрового сообщения длиной 1 байт (11001010) в двоичном коде.

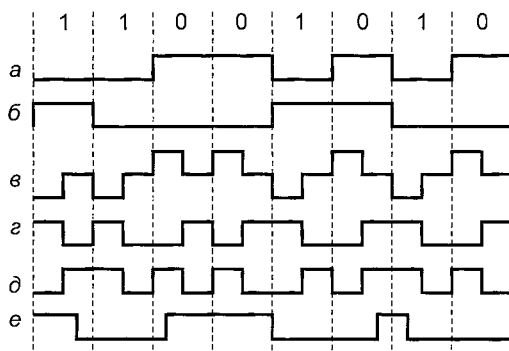


Рис. 5.1. Цифровые коды:

а — без возврата к нулю по уровню (NRZ); б — без возврата к нулю с инверсией на единицах (NRZ-1); в — с возвратом к нулю (RZ); г — манчестерский; е — блочный 4B5B + NRZ-1

5.2. Коды низкоскоростных СКС

Коды без возврата к нулю

Код NRZ — без возврата к нулю по уровню (см. рис. 5.1, а) является примером простейшей реализации модуляции уровнем сигнала. Основан на последовательной без каких-либо предварительных преобразований передаче отдельных битов исходного сообщения в канал связи. Главные преимущества — простота реализации и минимальная потребность в ширине полосы пропускания канала. Главный недостаток — сложность синхронизации, связанная с тем, что на длинных последовательностях следующих подряд друг за другом нулей и единиц подстройка тактовых генераторов приемника невозможна. Код NRZ имеет постоянную составляющую, т.е. для его передачи линия связи должна пропускать сигналы с нулевой частотой. Применение согласующих трансформаторов исключает эту возможность.

Код PNRZ (Polar Non Return to Zero) — полярный код без возврата к нулю. Логическая 1 кодируется отрицательным напряжением, логический 0 — положительным. Однако и в этом случае из-за невозможности передачи постоянной составляющей сигнал на длинных последовательностях нулей и единиц стремится к нулю, т.е. испытывает сильное искажение и не будет правильно передаваться.

Код NRZ-1 (Non Return to Zero, Invert on Ones) — без возврата к нулю с инверсией на единицах (рис. 5.1, б). Представляет собой простейшую реализацию принципа кодирования сменой уровня сигнала или дифференциального кодирования. Сигнал на протяжении всего тактового интервала не меняется, при этом логические 0 и 1 кодируются отсутствием и наличием смены уровня в начале интервала соответственно. Этот код с применением скремблирования, исключающий появление избыточных логических единиц, более помехоустойчив.

Коды с возвратом к нулю

Для увеличения помехоустойчивости в кодах этого класса используются более сложные принципы кодирования: добавления новых импульсов, возможной инверсии отдельных элементов по специально подобранному алгоритму, основной положительный эффект достигается введением в линейный сигнал определенной избыточности. Внешне она выражается в том, что тактовая частота f_d линейного сигнала возрастает по сравнению с информационной $f_{и}$, т.е. $f_d > f_{и}$.

Код RZ (Return to Zero) — с возвратом к нулю (рис. 5.1, в) использует импульсы разной полярности для представления логических 0 и 1 с возвратом к среднему уровню в середине тактового интервала. Главное преимущество — отсутствие постоянной составляющей сигнала. При передаче каждого бита сигнал дважды меняет свой уровень, что приводит к удвоению тактовой частоты и соответственно необходимой ширины полосы частот канала по сравнению с *NRZ*-кодом. Применение *RZ*-кодов требует формирования и обработки трехуровневых сигналов, что несколько усложняет технические решения приемопередатчиков.

Манчестерский (Manchester) код. Самосинхронизирующий код (рис. 5.1, г) без постоянной составляющей формирует сигнал только с двумя уровнями и определяет значение бита направлением смены уровня сигнала на середине тактового интервала. Логический 0 кодируется сменой уровня сигнала от низкого к высокому, а логическая 1 — от высокого к низкому (на тактовом интервале $T_{и}$ всегда присутствует импульс длительностью $T_{и}/2$,

причем при передаче 0 он находится в первой половине этого интервала, а при передаче 1 — во второй). При переходе от нуля к единице или обратно изменения уровня не происходит. Тактовая частота по сравнению с NRZ-кодом удваивается. Манчестерский код получил широкое распространение. Он используется во всех разновидностях интерфейсов сети Ethernet со скоростью передачи данных 10 Мбит/с (10 Base-5, 10 Base-2, 10 Base-T, FDIPL). Для последних тактовая частота линейного сигнала составляет 20 МГц. Для восстановления сигнала на приемной стороне верхняя граничная частота начала связи должна быть не менее половины тактовой частоты цифрового линейного сигнала.

Дифференциальный манчестерский (Differential Manchester) код (рис. 5.1, д) является разновидностью манчестерского. Середина тактового интервала линейного сигнала используется только для синхронизации и на ней всегда происходит смена уровня сигнала. Логические 0 и 1 передаются наличием или отсутствием смены уровня сигнала в начале тактового интервала соответственно. Рассматриваемый код обладает теми же самыми преимуществами и недостатками, что и манчестерский; используется в сети Token Ring, использующей частоты 4 и 16 Мбит/с.

5.3. Коды высокоскоростных СКС

Развитие сетей СКС идет по пути внедрения высокоскоростных сетевых устройств, обеспечивающих интерфейсы со скоростью передачи 100 и 1000 Мбит/с [29]. При этом реализуется следующий комплекс технических мероприятий:

- широкое применение процедур параллельной передачи информационного потока по нескольким витым парам одновременно;
- применение кодов с коррекцией ошибок;
- использование многоуровневого и/или блочного кодирования.

Применение указанных технических решений обеспечивает увеличение пропускной способности канала связи. В табл. 5.1 приведены основные характеристики оборудования (Приложений) высокоскоростных сетевых устройств.

Остановимся на некоторых особенностях их применения на сетях СКС.

Схема кодирования сети 100Base-T4. Интерфейс типа 100Base-T4 предусматривает использование кабелей категории 3 для передачи 100 мегабитных сигналов в полудуплексном режиме. Структурная схема взаимодействия двух сетевых интерфейсов представлена на рис. 5.2, а.

Таблица 5.1. Типы кодирования некоторых сетевых интерфейсов ЛВС

Приложение	Скорость передачи данных, Мбит/с	Вид кодирования	Тактовая частота линейного сигнала, МГц
Token Ring	4	Манчестерский код	8
Ethernet	10	То же	20
Token Ring	16	– » –	32
TP-PMD	100	NRZ-1+4B5B	125
TP-PMD, 100Base-TX	100	MLT-3+4B5B	62,5
100Base-T4	100	8B6T	25
ATM	155	MLT-3+4B5B	96,88
1000Base-T	1000	PAM-5	125

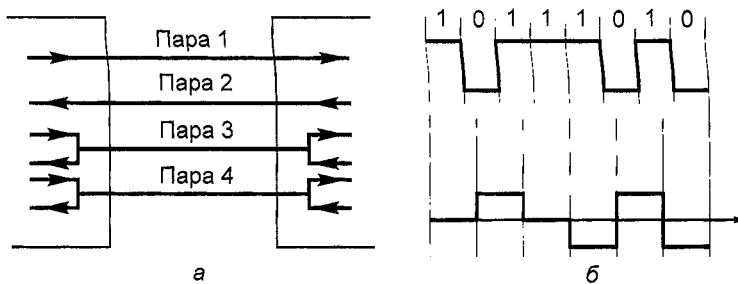


Рис. 5.2. Сетевой интерфейс 100 Base-T4:
 а — схема взаимодействия; б — кодирование 8В/6Т

В каждый момент времени задействовано одновременно три пары. Пары 1 и 2 реализуют однонаправленную передачу сигналов, пары 3 и 4 могут работать в двунаправленном режиме. Направление передачи данных по этим парам в конкретный момент времени определяется управляющими сигналами. Использование трех витых пар одновременно позволяет передать по каждой из них информационный поток со скоростью $100/3 = 33$ Мбит/с. Для уменьшения тактовой частоты применяется формирование линейного сигнала с использованием трехуровневого кода 8В/6Т. При этом восьмибитовый символ преобразуется в шесть трехуровневых, которые попарно передаются по трем витым парам. В результате этого тактовая частота линейного сигнала снижается до значения $(100/3 \cdot 6/8 = 25$ МГц). Минимальная ширина канала связи для передачи цифрового сигнала с такой частотой составляет 12,5 МГц,

что в 1,28 раза меньше ширины полосы пропускания стандартного кабельного тракта категории 3 (16 МГц).

Особенности организации СКС при кодировании TP-PMD и 100Base-TX идентичны друг другу и используют трехуровневый (квазитроичный) сигнал типа MLT-3. При этом передача выполняется только по двум витым парам категории 5 и может вестись в полнодуплексном режиме (рис. 5.3).

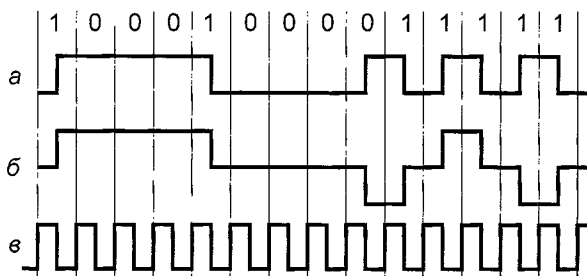


Рис. 5.3. Схема кодирования MLT-3:

а — сигнал в коде NRZ-1; б — сигнал в коде MLT-3; в — сигнал тактового генератора

На вход линейного кодера всегда поступает сигнал с тактовой частотой 125 МГц. В случае двух пар вдвое уменьшается тактовая частота сигнала, которая составляет $125/2 = 62,5$ МГц.

Особенности СКС при техническом решении 1000Base-T. Стандарт сети со скоростью передачи данных 1 Гбит/с (Gigabit Ethernet 1000Base-T) определяет технические решения для работы по четырем незэкранированным витым парам. Предусматривается работа в полнодуплексном режиме по каждой паре с граничной частотой пропускания 100 МГц и максимальной длиной 100 м с вероятностью ошибки не более 10^{-10} .

Для организации трактов СКС должны использоваться кабели категорий 5 и 6. В оборудовании применяется пятиуровневое кодирование PAM-5. На рис. 5.4 приведено графическое изображение кода. Передаваемый сигнал имеет набор из пяти фиксированных уровней (-2 ; -1 ; 0 ; $+1$; $+2$). Четыре из них используются для кодирования информационных битов, а пятый предназначен для коррекции ошибок. На наборе из четырех фиксированных уровней одной посылкой можно закодировать сразу два информационных бита, поскольку число возможных комбинаций из четырех по два равно четырем — 00, 11, 01 и 10. Таким образом, сигнал в коде Enhanced TX/T2 имеет тактовую частоту 125 МГц, что в два раза ниже тактовой частоты отдельных составляющих информационной последовательности. Передаваемые одновременно по всем парам кабеля пятиричные знаки представляют собой неделимую единицу ин-

формации размером 1 байт. При тактовой частоте $f_T = 125$ МГц по всем четырем парам кабеля передается поток $125 \text{ МГц} \cdot 2 \text{ бит/пара} \cdot 4 \text{ пары} = 1000$ Мбит/с. Полоса пропускания канала связи для безошибочного приема такой последовательности должна составлять не менее $f_{\Sigma} = f_T/2 = 125/2 = 62,5$ МГц.

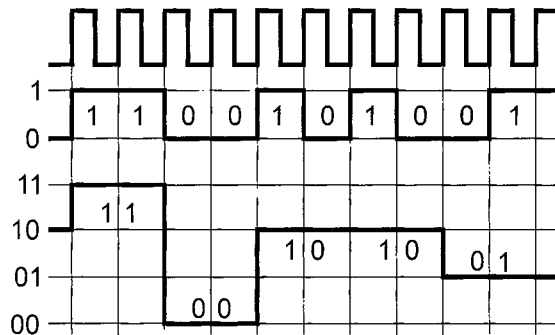


Рис. 5.4. Схема пятиуровневого кодирования PAM

Таким образом, сетевая аппаратура, применяемая для построения локальных и корпоративных сетей, и аппаратура сетей связи общего пользования используют одинаковые принципы передачи информации. Поэтому в структурированных кабельных системах контролируются и стандартизируются в основном те же параметры, что и в электрических и оптических сетях связи масштаба города и выше. Традиционно нормирование по основной массе характеристик для кабельной техники выполняется в частотной области.

Отличия в контролируемых характеристиках целиком и полностью определяются техническими особенностями трактов СКС, основополагающими из которых являются относительно небольшие длины каналов в сочетании с возможностью поддержки высоких скоростей информационного обмена, характерных для современных сетевых интерфейсов.

К основным параметрам, задаваемым стандартами и контролируемым в электрических трактах, относятся затухание и переходное затухание. Частотный диапазон их нормирования определяется категорией построенной линии.

В новейших перспективных приложениях с информационной пропускной способностью 100 Мбит/с и выше широко применяется принцип одновременной передачи общего информационного потока по четырем витым парам стандартного горизонтального кабеля СКС.

Соответствующий выбор способа кодирования линейного сигнала обеспечивает более полное использование потенциальной пропускной способности трактов СКС. При выборе способа кодирования решаются задачи обеспе-

чения требуемой помехоустойчивости и устойчивости синхронизации. Применение параллельной передачи одновременно по всем четырем парам и использование многоуровневых линейных кодов позволяет передавать информационные потоки со скоростью 1000 Мбит/с по стандартным электрическим трактам СКС с верхней нормируемой частотой 100 МГц.

В оборудовании СКС применяются коды, использующие прямоугольные импульсы, аналогичные кодам HDB-3, ЧПИ*. Поэтому для оценки параметров передачи и взаимных влияний между цепями сигналов сетей СКС может применяться модель, разработанная для цифровых трактов соединительных и абонентских линий.

* ЧПИ — код чередования полярности импульсов, имеющий также название «квазитроичный код». В англоязычной литературе код имеет аббревиатуру *AMI* (Alternative Mark Inversion signal).

Глава 6. Модель ЭМС линий СКС для кодов низкоскоростных электрических систем

6.1. Основные положения

В основу теоретических исследований положен единый подход анализа электромагнитной совместимости цепей дискретной и аналоговой информации, заключающийся в выборе критериев и создании модели взаимных влияний с учетом амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) параметров передачи и влияния линий и приемных устройств.

Не претендуя на авторство, некоторые аспекты теории даны в соответствии с материалами, изложенными в [9]. В книге представлена частотная модель для расчета вероятности ошибок в цифровом тракте передачи для кодов, получивших широкое распространение в аппаратуре связи (HDB-3, ЧПИ), которая может быть использована и для линий структурированных сетей.

Вероятность ошибки в цифровом тракте, рассчитывается на модели, отображающей, с одной стороны, электрические свойства направляющей системы (кабеля), а с другой — характеристики передаваемого сигнала. Модели, в которых электрические свойства кабеля описываются частотными характеристиками коэффициентов передачи, а сигнал энергетическим спектром, называются частотными. В соответствии с моделью вероятность ошибки оценивается отношением сигнал/помеха на входе решающего устройства. Построение частотной модели базируется на соотношении, характеризующем прохождение случайного процесса через линейный четырехполюсник, согласно которому спектральная плотность на его выходе выражается как произведение спектральной плотности на входе четырехполюсника и квадрата модуля частотной характеристики коэффициента передачи.

6.2. Модель ЭМС цепей в кабелях СКС для манчестерского кода

Помехоустойчивость линейного тракта цифровой системы передачи (ЦСП) определяется помехоустойчивостью абонентского участка линии СКС. Помехоустойчивость принято оценивать с помощью вероятности ошибки P_e .

При этом под *ошибкой* подразумевают неправильную регенерацию передаваемого символа, а вероятность ошибки задается соотношением, отображающим сходимость по вероятности

$$P[(P_e - n/N) > \varepsilon] = 0, N \rightarrow \infty,$$

где n — число неправильно регенерируемых символов; N — общее число переданных символов линейного сигнала за конечный отрезок времени; n/N — частота ошибки; ε — любое, наперед заданное малое число.

При скоростях, принятых в иерархических ЦСП, в том числе СКС, частота ошибки, измеряемая на отрезке в несколько секунд, практически равна вероятности ошибки.

Значение вероятности ошибки участка СКС обусловлено воздействием на линейный сигнал межсимвольных искажений (МСИ) и помех.

Напряжение МСИ ограничено сверху и определяется принятым способом коррекции и структурой кода в линии и ограничивается допустимой долей порогового напряжения, установленного в решающем устройстве регенератора.

Рассмотрим модель ЭМС в кабельной линии (рис. 6.1).

На элементарных участках линейных трактов ЦСП СКС, использующих симметричные кабели, при организации связи имеют место помехи, обусловленные следующими факторами:

- переходным влиянием между цепями на ближнем конце (ПВБК);
- попутным потоком (ПП), обусловленным несоответствием входного и волнового сопротивления цепей и неоднородностей волнового сопротивления вдоль линии;
- переходным влиянием на дальнем конце участка (ПВДК), определяющим степень влияния вследствие отражения из-за несогласованности входного сопротивления аппаратуры и волнового сопротивления линии;
- собственными, или тепловыми шумами (ТШ).

Цифровой сигнал и помехи с линии проходят регулируемый корректирующий усилитель (РКУ) и попадают на вход решающего устройства (РУ), где и происходит эта оценка вероятности ошибки.

Все указанные помехи относятся к классу аддитивных, так как их напряжение в любой момент складывается с напряжением сигнала. Эти помехи образуются в результате прохождения случайного цифрового сигнала по кабельным цепям и могут быть представлены как случайные процессы на выходе эквивалентных четырехполюсников (ЭЧС). Тепловой шум также представляет собой случайный процесс.

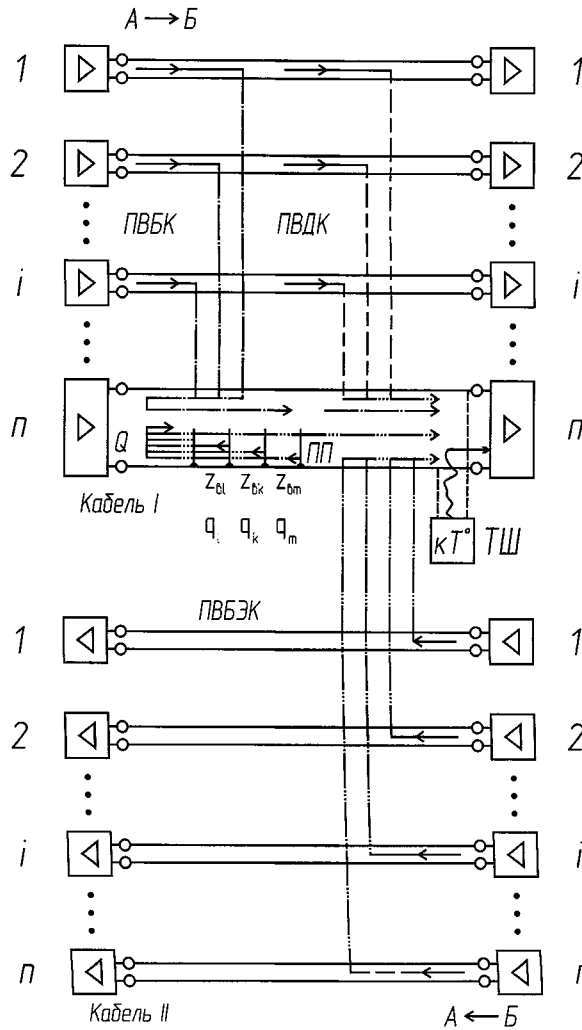


Рис. 6.1. Схема взаимных влияний между цепями многопарных кабелей:

ПВБК — переходное влияние на ближнем конце; ПВДК — то же на дальнем конце;

ПВБЭК — то же пар встречных направлений передачи; ПП — полутный поток;

ТШ — тепловой шум; Z_{bt}, Z_{bk}, Z_{bm} — волновые сопротивления однородных участков кабеля;

q_l, q_k, q_m — коэффициенты отражения отрезков кабеля с различными волновыми сопротивлениями;

Q — коэффициент отражения в точке подключения оборудования к кабелю

Опуская подробности теоретических обоснований, приведенных в [9], отметим, что верность передачи (вероятность ошибки) на горизонтальном участке при передаче сигналов СКС в манчестерском коде определяется выражением

$$P_e = 1 - \Pi^* \left(\frac{A}{2\sqrt{N}} + \frac{\sqrt{N}}{A} \ln 2 \right), \quad (6.1)$$

где $1 - \Pi^*(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-y} \exp(U^2/2) du$ — интеграл вероятности; A — амплитуда импульса; $N = \int_0^{\infty} S(f) df$ — помеха; u — суммарное напряжение.

При условии $A/2\sqrt{N} \gg \sqrt{N}/A$ и с достаточной для практических вычислений точностью эта формула может быть упрощена:

$$P_e \approx 1 - \Pi^* \left(\frac{A}{2\sqrt{N}} \right), \quad (6.2)$$

где $A/2$ — пороговое напряжение.

Для вычисления интеграла вероятности при $y > 5$ существует достаточно точное приближение:

$$1 - \Pi^*(y) = \sqrt{\frac{2}{y}} \cdot \frac{1}{y} 10^{-y^2/\ln 10} \left[1 - \frac{1}{y^2} \right]. \quad (6.3)$$

Выражение $A/2\sqrt{N}$ — называют *отношением сигнал/шум*.

Требуемое значение вероятности ошибок на участке СКС устанавливается на основе следующих соотношений. Известно, что при вероятности ошибки на линейном тракте 10^{-5} качество передачи речи по каналу тактовой частоты (ТЧ), образованному с помощью ЦСП, воспринимается абонентом как «хорошее», а при вероятности 10^{-6} — как «отличное». Вероятность ошибки 10^{-6} принято относить к длине линейного тракта, равного 2500 км. Полагая, что вероятности ошибок на регенерационных участках независимы и равны друг другу, для регенерационного участка длиной 5 км получаем $P_e \leq 2 \cdot 10^{-9}$, а для регенерационного участка 2,5 км — $P_e \leq 10^{-9}$. При теоретической оценке участка СКС ориентируются на вероятность ошибок $P_e = 10^{-10}$.

Учитывая, что обобщенной оценкой качества передачи на регенерационном участке является вероятность ошибки P_e , значения которой зависят от суммарной мощности всех видов помех и межсимвольных искажений, определим долю, приходящуюся на линейные помехи:

$$P_e = 1 - \Pi^* \left[k(U_n - u) \right] \sqrt{N}. \quad (6.4)$$

Здесь u — суммарное напряжение МСИ; k — относительная доля порогового напряжения U_n , выделяемого на линейное переходное влияние; N — суммарная мощность помех.

Зависимость вероятности ошибки от соотношения сигнал/шум согласно [9] приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Зависимость вероятности ошибки от величины защищенности

Отношение сигнал/шум	6,1	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7
Отношение сигнал/шум, дБ	15,7	16,2	16,6	17,0	17,4	17,7
Вероятность ошибки P_e	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}

6.3. Модель взаимных влияний между цепями ЦСП при однокабельной системе связи

Построение частотной модели [9] базируется на соотношении, характеризующем прохождение случайного процесса через линейный четырехполосник, согласно которому спектральная плотность на его выходе выражается как произведение спектральной плотности на входе четырехполосника и квадрата модуля частотной характеристики коэффициента передачи.

При этом за критерий оценки качества передачи принимается вероятность ошибки на исследуемом участке, определяемой соотношением сигнал/помеха на входе решающего устройства приемника.

Обобщенная модель взаимных влияний между цепями ЦСП при встречной (однокабельной) передаче сигналов, показана на рис. 6.2.

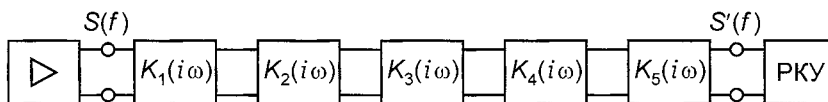


Рис. 6.2. Частотная модель переходных влияний на ближнем конце

PKU — регулируемый корректирующий усилитель;

$K_1(i\omega)$ — частотная характеристика четырехполосника, имитирующего непосредственное влияние на ближний конец;

$K_2(i\omega)$ — частотная характеристика коэффициента передачи PKU;

$K_3(i\omega)$ — АЧХ влияющей цепи;

$K_4(i\omega)$ — АЧХ цепи, подверженной влиянию;

$K_5(i\omega)$ — частотная характеристика четырехполосника, имитирующего влияние на ближний конец вследствие рассогласования входных и волновых сопротивлений линий.

Каждая из составляющих может быть представлена как элемент частотной модели.

Так, для составляющей, определяющей непосредственное переходное влияние между цепями на ближнем конце (ПВБКН), спектральная плотность помехи на входе РУ приемника составляет

$$S_{\text{ПВБКН}} = S(f) |K_1(i\omega)|^2 |K_2(i\omega)|^2, \quad (6.5)$$

или дисперсия случайного процесса (мощность на единичном сопротивлении или средний квадрат напряжения помехи) может быть представлена выражением:

$$N_{\text{ПВБКН}} = \int_0^{\infty} S(f) |K_1(i\omega)|^2 \exp[-2A_{0i}] df. \quad (6.6)$$

Для других составляющих запишем:

из-за отраженных потоков на стыках линий с различным волновым сопротивлением и входным сопротивлением аппаратуры (рис. 6.3) —

$$N_{\text{ПВБО}} = \int_0^{\infty} S(f) |K_3(i\omega)|^2 |K_4(i\omega)|^2 \exp[-2A_3(f, \ell)] df; \quad (6.7)$$

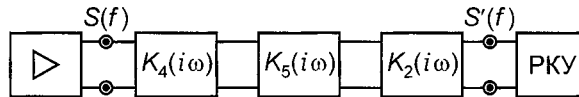


Рис. 6.3. Влияния несогласованности волнового сопротивления линий и входного сопротивления оборудования

из-за внутренних ТШ аппаратуры (рис. 6.4) —

$$N_{\text{ТШ}} = KT^0 Z_B \int_0^{\infty} |K_2(i\omega)|^2 \exp[\alpha(f), \ell] df; \quad (6.8)$$

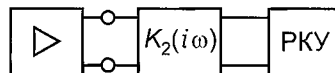


Рис. 6.4. Влияние теплового шума

из-за отраженных потоков от неоднородности линий (рис. 6.5) —

$$N_{\text{ПП}} = \int_0^{\infty} S(f) |Q_{\text{ЭКВ}}|^2 |K_4(i\omega)|^2 df; \quad (6.9)$$

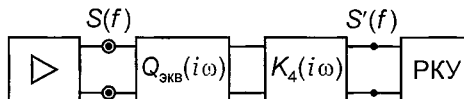


Рис. 6.5. Влияние попутного потока из-за неоднородности волновых сопротивлений вдоль линии

из-за внешнего электромагнитного воздействия (рис. 6.6) —

$$N_{\text{вп}} = \int_0^{\infty} S_{\text{вп}}(f) |K_4(i\omega)|^2 df. \tag{6.10}$$

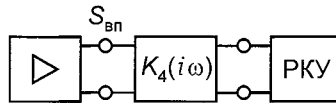


Рис. 6.6. Влияние внешних помех

В связи с тем, что перечисленные помехи, учитываемые представленной моделью, взаимонезависимы, то дисперсия результирующего случайного процесса (мощность помехи) на входе РУ будет равна сумме дисперсии составляющих напряжения помех:

$$N = N_{\text{ПВБКИ}} + N_{\text{ПВБО}} + N_{\text{ТШ}} + N_{\text{ПШ}} + N_{\text{ВП}}. \tag{6.11}$$

Представленная модель позволяет определить исходные данные для выбора условий ЭМС цепей ЦСП в кабелях СКС.

Поскольку в данной главе интерес представляют требования к взаимным влияниям между цепями, то основной критерий, характеризующий условия ЭМС, может быть рассчитан так:

$$P_e = \frac{1 - P^* [K(U_n - u)]}{\sqrt{N_{\text{ПВБКИ}}}}. \tag{6.12}$$

Таким образом, по формуле (6.12) может быть определена требуемая величина переходного затухания между цепями при заданных вероятности ошибок, межсимвольных искажений, частотных характеристиках сигнала и корректирующих устройств.

В соответствии с существующей практикой нормирования параметров влияния между цепями, уплотненными цифровыми системами передачи, работающими кодом ПДВ-3 (ЧПИ), например ИКМ-30, при заданной вероятности ошибок $p = 10^{-9}$ устанавливается величина защищенности сигнал/помеха $a_3 = 17,7$ дБ. Для манчестерского кода при $p = 10^{-9}$ значение $a_3 = 16,2$ дБ.

Поэтому при работе ЦСП по однокабельному варианту нормируется переходное затухание между цепями на ближнем конце A_0 , дБ, на полутактовой частоте, на которой сосредоточен максимум энергии:

$$A_0 = a_3 + \alpha l + 10 \lg N, \tag{6.13}$$

где $a_3 = 24,7$ — защищенность сигнал/помеха; αl — затухание тракта передачи, дБ; N — количество цепей в кабеле, уплотненных оборудованием ЦСП.

При двухкабельной организации связи нормируется величина защищенности между цепями на дальнем конце, дБ:

$$A_3 = a_3 + 10 \lg N. \quad (6.14)$$

6.4. Взаимные влияния между цепями горизонтальной проводки СКС

Участок горизонтальной проводки СКС использует кабели категорий 3, 5, 5е и 6 с применением оборудования низкоскоростных и высокоскоростных систем передачи.

Для низкоскоростных систем скорость цифровых потоков рассчитана до 10 Мбит/с (10 Base-5; 10 Base-2; 10 Base-T; FOIRL). Для высокоскоростных сетевых устройств ЛВС-100 и 1000 Мбит/с.

В главе 5 приведены технические характеристики оборудования и сетевые интерфейсы, применяемые на СКС.

Особенностью сетей СКС является то, что передача сигналов цифрового обмена осуществляется по стандартному четырехпарному кабелю с разбиением общего потока на три с последующим его объединением в оконечном приемном устройстве.

Модель влияния между цепями СКС на горизонтальном участке

В соответствии со структурой СКС в горизонтальной подсистеме применяются четырехпарные кабели категорий 3, 5, 5е, 6 с применением низко- и высокоскоростных сетевых устройств. Рассмотрим особенности взаимных влияний между цепями с учетом специфики организации систем передачи на примере сетевого интерфейса 100Base-T4 (рис. 6.7).

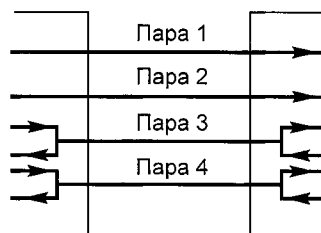


Рис. 6.7. Схема организации связи СКС по кабелю UTP 4x2x0,52

Одновременно работают три пары: по каждой из них передается поток со скоростью $100/3 = 33,33$ Мбит/с. Используется код 8В/6Т (рис. 6.8) восьмибитовый сигнал (шесть трехуровневых символов), который попарно передается по трем витым парам. Тактовая частота линейных сигналов может снижаться до значений $100/3 \times 6/8 = 25$ МГц (полный линейный спектр).

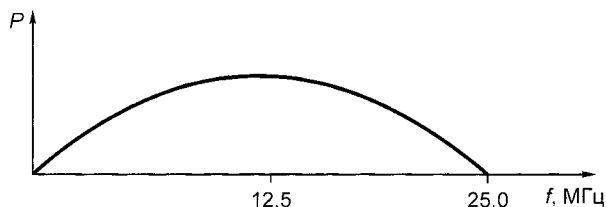


Рис. 6.8. Спектральная плотность сигнала кода 8В/6Т:
 P — спектральная плотность кода

Оценка параметров осуществляется на полутактовой частоте 12,5 МГц.

Рассмотрим пути влияния между цепями в четырехпарном кабеле УТР $4 \times 2 \times 0,52$ (рис. 6.9). Приемник включен в цепь в пункте А.

Пути влияния на пару 3:

1–3 — по закону ближнего конца;

2–3 — по закону дальнего конца;

4–3 — по закону ближнего конца.

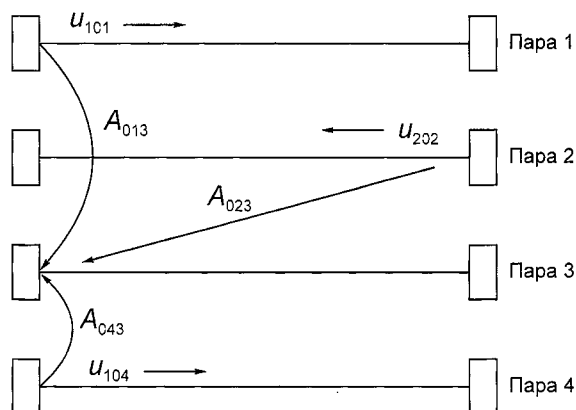


Рис. 6.9. Схема влияний на СКС горизонтального участка:
пары 1, 2, 4 — влияющие; пара 3 — подвержена влиянию

Результирующая величина переходной помехи в цепи пары 3, подверженной влиянию, определяется выражением

$$U_{\text{рез}} = \sqrt{U_{101}^2 \cdot e^{-2A_{013}} + U_{104}^2 \cdot e^{-2A_{043}} + U_{202}^2 \cdot e^{-2\alpha l} \cdot e^{-2A_{l23}}}. \quad (6.23)$$

Рассмотрим частотную модель расчета вероятности ошибок на горизонтальном участке СКС (рис. 6.10) с применением кабеля UTP 4×2×0,52 в соответствии с положениями, изложенными в [9].

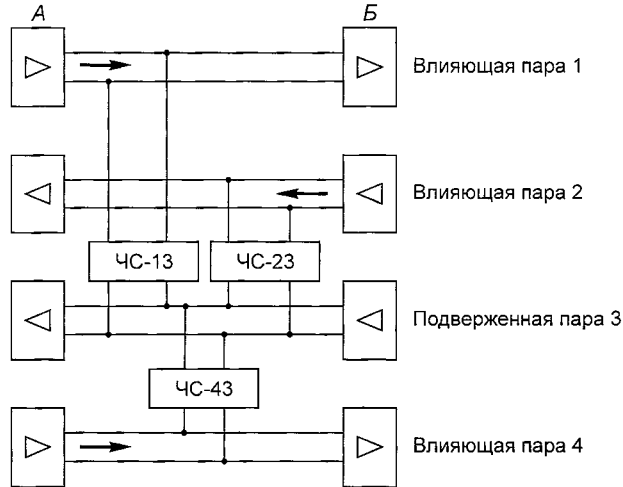


Рис. 6.10. Частотная модель влияния на СКС горизонтального участка:
 ЧС — фиктивный четырехполюсник связи между i -й и l -й парами

На рис. 6.11, 6.12 представлены эквивалентные схемы взаимных влияний. Пути влияния между парами в кабеле при передаче сигналов в соответствии с интерфейсом, описывающим процедуру передачи, показаны в виде фиктивных четырехполюсников связи (ЧС).

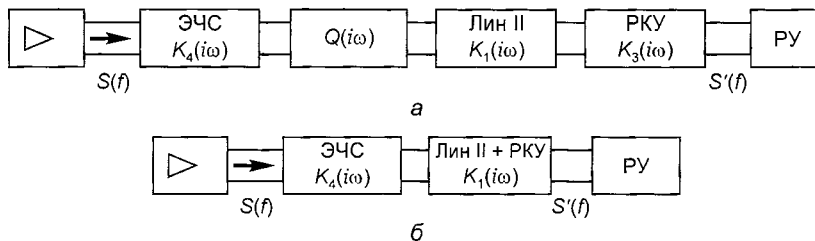


Рис. 6.11. Частотная модель переходного влияния на ближнем конце:
 а — исходная модель; б — окончательный вид модели после преобразований;
 $K_4(i\omega)$ — коэффициент передачи влияющей линии; $K_3(i\omega)$ — то же решающего устройства;
 $K_1(i\omega)$ — то же линии подверженной влиянию; $Q(i\omega)$ — коэффициент, учитывающий отражение энергии в местах с различным волновым сопротивлением; РУ — решающее устройство;
 РКУ — регулируемый корректирующий усилитель; ЭЧС — эквивалентный четырехполюсник связи;
 $S(f)$ — спектральная плотность на входе в линию; $S'(f)$ — то же на входе РУ

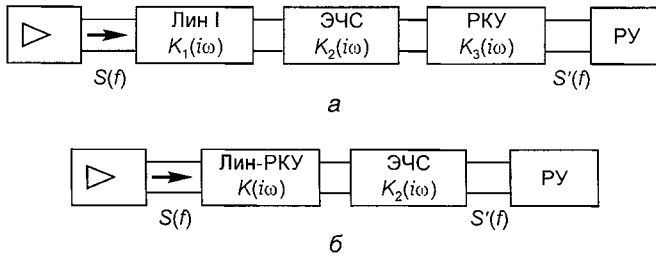


Рис. 6.12. Частотная модель переходного влияния на дальнем конце:
 а — исходная модель; б — окончательный вид модели с четырехполосником,
 характеризующим коэффициент передачи, и РКУ

Как отмечалось выше, вероятность ошибки на участке линий определяется отношением сигнал/помеха на входе решающего устройства (РУ) оборудования. Частотная модель базируется на соотношении, характеризующем прохождение случайного процесса через линейный четырехполосник, согласно которому спектральная плотность на его выходе выражается как произведение спектральной плотности на входе четырехполосника и квадрата модуля частотной характеристики коэффициента передачи.

В соответствии с [9] спектральная плотность помехи за счет переходного влияния на ближнем конце ПВБК (A_0) определяется выражением

$$S_{\text{ПВБК}}(f) = S(f) |K(i\omega)|^2 |K_4(i\omega)_\Sigma|^2. \tag{6.14}$$

Дисперсия случайного процесса, или средний квадрат напряжения помех за счет переходного влияния на ближнем конце ПВБК (A_0) имеет вид

$$N_{\text{ПВБК}} = \int_0^\infty S(f) |K(i\omega)|^2 |K_4(i\omega)_\Sigma|^2 df; \tag{6.15}$$

$$S_{\text{ПВЛК}}(f) = S(f) |K(i\omega)|^2 |K_2(i\omega), l|^2. \tag{6.16}$$

Дисперсия случайного процесса, или средний квадрат напряжения помех за счет переходного влияния на дальний конец ПВДК (A_1) рассчитываются по формуле

$$N_{\text{ПВБК}} = \int_0^\infty S(f) |K(i\omega)|^2 \text{dcc}[-0,1A, e_\Sigma(f, l)] df. \tag{6.17}$$

При оценке влияния в тракте СКС учитываются помехи, возникающие из-за отражения от неоднородности волновых сопротивлений на линии и на стыке линия–оборудование.

Спектральная плотность помехи, обусловленная попутным потоком, рассчитывается так:

$$S'(f) = S(f) |Q_{\text{экв}}|^2 |K(i\omega)|; \quad (6.18)$$

$$N_{\text{пп}} = \int_0^{\infty} S(f) |Q_{\text{экв}}|^2 |K(i\omega)|^2 df. \quad (6.19)$$

Аналогична оценка переходных помех на дальний конц.

Не будем подробно излагать теоретическое обоснование указанного тезиса, а воспользуемся лишь окончательными выводами.

Итак, в качестве основных параметров примем вероятность ошибки P_c , дисперсию случайного процесса (средний квадрат напряжения помех) N .

6.5. Упрощенная оценка условий ЭМС в кабельных линиях структурированных систем

Рассмотрим упрощенную методику определения переходного затухания между цепями в четырехпарном кабеле UTP 4×2×0,52 на горизонтальном участке СКС при работе оборудования 10Base-5, 10Base-2, 10Base-T с манчестерским кодом, который используется в разновидностях интерфейсов сети Ethernet, имеющих скорость передачи данных 10 Мбит/с. Тактовая частота линейного сигнала составляет 20 МГц. Как было показано ранее, для восстановления сигнала на приемной стороне верхняя граничная частота канала связи должна составлять не менее половины тактовой частоты цифрового линейного сигнала. Таким образом, в нашем случае достаточно определить величину переходного затухания между цепями на ближнем конце на частоте 10 МГц для схемы представленной на рис. 6.13.

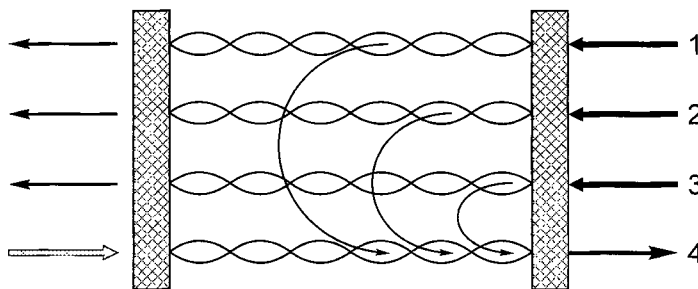


Рис. 6.13. Схема влияния между цепями в четырехпарном кабеле UTP 4×2×0,64:
1–3 — влияющие цепи; 4 — подверженная влиянию пара

В качестве среды передачи выберем кабель UTP 4×2×0,52 категории 3. Максимально допустимое затухание для горизонтального кабеля в соответ-

ствии со стандартом TIA/EIA-568-A на длине 100 м на частоте 10 МГц составит 9,7 дБ.

Тогда A_0 (*NEXT*) для предложенной схемы найдем по формуле

$$A_0 = 16,2 + 9,7 + 10 \lg 3 = 27 \text{ дБ.}$$

Сравним предложенную оценку пригодности кабеля СКС для горизонтального участка с данными определенными по методике, изложенной, например в стандарте TIA/EIA-568-A.

В табл. 6.1, 6.2 приведены требования к затуханию и минимальному значению *NEXT* (A_0).

Таблица 6.1. Максимально допустимое затухание для горизонтальных кабелей категорий 3 и 5 при 20 °С по TIA/EIA-568-A, дБ

Частота, МГц	Категория 3		Категория 5	
	100 м	305 м	100 м	305 м
0,772	2,2	6,8	1,8	5,5
1,00	2,6	7,8	2,0	6,3
4,00	5,6	17	4,1	13,0
10,00	9,7	30	6,5	20
16,00	13,1	40	8,2	25
20,00	–	–	9,3	28
31,25	–	–	11,7	36
62,50	–	–	17,0	52
100,00	–	–	22,0	67

Таблица 6.2. Требования к минимальному значению *NEXT* (A_0) для горизонтальных кабелей категорий 3 и 5, дБ

Частота, МГц	Категория 3	Категория 5
0,772	43	64
1,00	41	62
4,00	32	53
10,00	26	47
16,00	23	44
20,00	–	47
31,25	–	40
62,50	–	35
100,00	–	32

Определим требования к переходному затуханию между цепями на ближнем конце для условий передачи по четырехпарному кабелю UTP 4×2×0,52 с применением высокоскоростного оборудования 100Base-T4 со скоростью передачи 100 Мбит/с.

Как отмечалось ранее, передача осуществляется по трем «витым» парам, по каждой из которой передается сигнал со скоростью $100/3 = 33$ Мбит/с. Применяется код 8В/6Т, преобразующий восьмибитовый символ в шесть трехуровневых. В результате этого снижается тактовая частота до 25 МГц. Условия передачи оцениваются на полутактовой частоте 12,5 МГц.

На основе упрощенной методики определения пригодности кабеля для использования в сети категории 3 рассчитаем требуемую величину A_0 (*NEXT*) на частоте 12,5 МГц для линий 100 м:

$$A_0 = \alpha_3 + \alpha \ell + 10 \lg N = 16,2 + 7,5 + 3 = 26,7 \text{ дБ.}$$

Сравним результаты расчета с минимальными значениями *NEXT* для горизонтальных кабелей категорий 3.

Упрощенная оценка условий электромагнитной совместимости цепей СКС может осуществляться на полутактовой частоте используемых кодов, что гарантирует передачу сигналов с заданными скоростями.

Раздел 3

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ДОСТУП НА СЕТЯХ ЕСЭ

Глава 7. Классификация технологий DSL на медных кабелях

7.1. Основные положения

В последние годы большое внимание уделяется развитию широкополосного мультисервисного доступа. Этому вопросу посвящено различная литература. Неоднократно проводились научно-технические конференции. Оборудование демонстрировалось на выставках «Связь-Экспокомм», «НОРВЕКОМ». Опыт внедрения на сетях связи обобщен в специальных выпусках журнала «Технологии и средства связи»: «Системы абонентского доступа» (2004, 2005 гг.) и «Широкополосные мультисервисные сети» (2005 г.).

Авторы публикаций пытались ответить на следующие вопросы:

- Какие технологии абонентского доступа наиболее популярны сегодня и будут востребованы завтра на российском рынке?
- Как оцениваются перспективы развития сетей и рынка оборудования широкополосного мультисервисного доступа в России? Какие инфокоммуникационные услуги как для индивидуальных, так и для корпоративных пользователей будут стимулировать развертывание таких сетей?

Анализ материалов показывает глубокую проработку сетевых вопросов операторами и производителями средств связи, технических характеристик оборудования и его применения. К сожалению, мало внимания уделено среде передачи широкополосного доступа, в частности, кабелям и линиям с медными жилами. А они требуют серьезного подхода к своей разработке. Проблема явно выросла из «коротких штанишек» обычных городских телефонных сетей.

Рассмотрим требования к техническим характеристикам появляющегося нового класса кабелей — *кабелей широкополосного доступа* (КШД). В осно-

ву разработки требований к ним положим технические характеристики оборудования цифрового уплотнения сетей доступа и схемы организации связи.

Сфера абонентского доступа в последнее десятилетие представляет собой одну из наиболее динамично развивающихся областей телекоммуникаций. Современные технологии обеспечивают предоставление пользователю полного набора услуг (передачу речи, данных и видеоинформации) по одной линии связи, соединяющей его с оператором мультисервисной сети связи (МСС). Для организации абонентского доступа задействуются различные среды передачи, а количество используемых при этом технологий не поддается уже даже простому подсчету. Поэтому задача систематизации в данной области считается в настоящее время весьма актуальной.

Существующие технологии абонентского доступа можно разделить на два основных класса: проводные и беспроводные. Не будем касаться технологий беспроводного абонентского доступа, так как его достоинства и недостатки достаточно полно изложены в различных источниках.

К одному из важнейших критериев для классификации технологий проводного абонентского доступа относится *используемая среда передачи*. Это может быть скрученная, или витая медная пара (в дальнейшем под «витыми» парами будем понимать пары, скрученные однонаправленной скруткой с согласованными шагами), коаксиальные кабели, оптоволоконные кабели, кабели для СКС, а также проводка сетей электропитания или радиотрансляционных сетей. С учетом данного критерия технологии проводного абонентского доступа подразделяются на следующие группы:

- технологии DLS-доступа (скрученные медные пары);
- технологии кабельного телевидения (коаксиальный и оптоволоконный кабель);
- технологии сети оптического доступа (Optical Access Network, OAN);
- технологии сетей коллективного доступа (проводка сетей электропитания, проводка радиотрансляционных сетей);
- технологии локальных вычислительных сетей (СКС на основе витых пар категорий 3, 4 и 5, коаксиальный кабель и оптоволоконный кабель).

Помимо перечисленных, классификация включает также технологии доступа к услугам цифровой сети с интеграцией служб (Integrated Services Digital Network, ISDN) и услуги, предоставляемые абонентам ТфОП.

Доступ к традиционным сетям связи

ТфОП создавалась для предоставления услуг телефонии. Доступ абонентов к услугам ТфОП, набор которых весьма ограничен, осуществляется по линиям связи на основе скрученных медных пар с помощью оборудования

(телефонных и факсимильных аппаратов, а также dial-up-модемов), функционирующего в соответствии с алгоритмами установления телефонных соединений.

Услуги ТфОП ограничены полосой частот стандартного телефонного канала 300–3400 Гц. Максимальная скорость передачи информации при организации доступа через ТфОП к корпоративным и Интернет-сетям составляет 56,7 кбит/с. При этом абонент не может одновременно пользоваться услугами телефонии и сети Интернет. Таким образом, возможности расширения набора предоставляемых услуг и увеличения скорости доступа к этим услугам в сети ТфОП в значительной степени исчерпаны.

Доступ в сетях ISDN также осуществляется по скрученной медной паре, однако при этом набор предоставляемых услуг по сравнению с ТфОП существенно больше. Базовый ISDN-доступ (канал 144 кбит/с, 2B+D) обеспечивает абоненту одновременный доступ к услугам телефонии и передачи данных. Тем не менее в силу невысокой эффективности использования сетей с коммутацией каналов для передачи пакетных данных, а также достаточно высокой стоимости технологии, ISDN-доступ не получил широкого распространения.

Главная особенность МСС — возможность передачи мультимедийной информации по одной единственной линии связи, соединяющей абонента с сетью, что требует создания сетей с высокой пропускной способностью. Развитие технологий абонентского доступа в последние годы идет именно в этом направлении.

Технологии xDSL

По сути развитие технологий xDSL отражает развитие методов передачи сигналов по «витой» паре. Эти технологии обеспечивают доступ к широкому спектру услуг по передаче мультимедийной информации. Вопросами стандартизации, а также продвижения технологий xDSL на рынке занимаются различные международные организации (ITU, ANSI, ETSI, DAVIC, ATM Forum, ADSL Forum и др.).

Данные технологии можно разделить на две подгруппы — технологии симметричного и асимметричного DSL-доступа. Первые находят применение главным образом в корпоративном секторе, а вторые предназначены для предоставления мультимедийных услуг преимущественно индивидуальным пользователям.

Технологии симметричного DSL-доступа. Можно выделить восемь технологий (рис. 7.1):

- IDSL (ISDN DSL) — нестандартизованная технология передачи данных по одной медной паре со скоростью до 128 кбит/с. Используются метод

линейного кодирования 2B1Q с эхокомпенсацией, а также те же модемы или терминальные адаптеры, что и в сетях ISDN. Технология IDSL в отличие от ISDN поддерживает режим постоянного соединения с провайдером. Может применяться для организации одновременной передачи речи и данных по одной витой паре на большие расстояния (до 40 км);

- HDSL (High-Bit-Rate DSL) — технология передачи потоков T1 (1544 кбит/с) по двум «витым» парам (стандарт ANSI — T1.TR.28) или потоков E1 (2048 кбит/с) по трем «витым» парам (стандарт ETSI — TS 101 135). В технологии используется метод линейного кодирования 2B1Q или модуляция QAM (QAM-8–QAM-256). Системы передачи на базе технологии HDSL имеют большую длину регенерационного участка и поэтому находят широкое применение при организации и модернизации трактов E1 и T1, объединении сегментов LAN, организации выносов и т.п. Технология HDSL стандартизована также ИТУ-Т (Рекомендации G.991.1);
- SDSL (Symmetrical/Single Pair DSL) — вариант HDSL, рассматриваемый как самостоятельная технология, в которой для передачи используется одна «витая» пара. Реализуемая скорость — от 128 до 2320 кбит/с, метод линейного кодирования — 2B1Q. Оборудование SDSL используется, в частности, для связи локальных сетей по телефонным линиям;

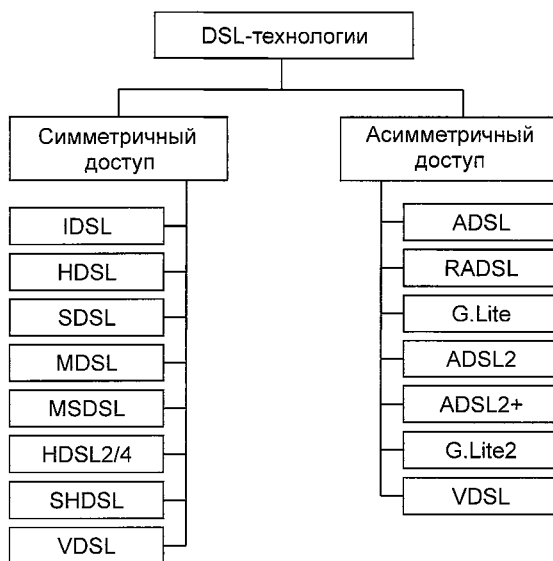


Рис. 7.1. Технологии проводного доступа

- MDSL (Moderate Speed DSL) — среднескоростной вариант SDSL (от 384 до 1168 кбит/с). Реализуется код 2B1Q с адаптацией скорости передачи к условиям связи;
- MSDSL (Multirate Symmetrical/Single Pair DSL) — вариант SDSL со скоростью передачи от 144 до 2320 кбит/с. Используется технология линейного кодирования CAP с адаптацией скорости передачи к условиям связи;
- SHDSL (Single-Pair High-speed DSL) — стандартизованная ITU-технология (Рекомендация G.991.2) передачи цифровых потоков со скоростью от 192 до 2320 кбит/с по одной «витой» паре. Предусмотрена возможность работы по двум «витым» парам со скоростью от 384 до 4640 кбит/с. Способ модуляции TC-PAM обеспечивает спектральную совместимость при работе по одному кабелю оборудования SHDSL с системами ISDN, HDSL, ADSL. Заложены возможности работы в МСС на базе транспортных технологий ATM, IP, Frame Relay;
- HDSL2/4 — стандартизованная ANSI (T1.TRQ.06-2001) технология передачи потока T1 по одной или двум «витым» парам — аналог SHDSL для скоростей передачи до 1,5 Мбит/с. Способ модуляции — TC-PAM;
- VDSL (Very High Speed DSL) — симметричный режим работы VDSL-систем, предусмотренной стандартом TS 101 270 организации ETSI. Скорость передачи цифровых потоков по обычной «медной» паре достигает 13 Мбит/с.

Технологии асимметричного DSL-доступа. Можно выделить семь технологий (см. рис. 7.1):

- ADSL (Asymmetrical DSL) — технология передачи цифровых потоков со скоростями (Рекомендация G.992.1 ITU-T) не менее 6,144 Мбит/с в сторону пользователя и 640 кбит/с в обратном направлении на расстояние до 2,7 км. Использование метода кодирования DMT позволяет обеспечить одновременную высокоскоростную передачу данных и речевых сигналов по одной «витой» паре. Оборудование ADSL-доступа подключается к транспортным сетям по SDH- и ATM-технологиям. Помимо ITU-T стандарты для ADSL-технологии были разработаны также ANSI (T1.413) и ETSI (TS 101 388);
- RADSL (Rate Adaptive DSL) — нестандартизованный в ITU-T вариант ADSL, позволяющий изменять скорость передачи в линии по желанию оператора либо по такому критерию, как качество линии. В настоящее время адаптация скорости передачи к параметрам линии реализуется во всем выпускаемом ADSL-оборудовании;
- G.Lite (Universal ADSL) — технология передачи цифровых потоков по обычной «медной» паре со скоростями (Рекомендация G.992.2 ITU-T)

- не более 1,536 Мбит/с в сторону пользователя и 512 кбит/с в обратном направлении на расстояние до 3,5 км. Используется метод передачи DMT. Служит для организации доступа в сеть Интернет по «витой» медной паре как альтернатива дорогостоящему ADSL-доступу;
- ADSL2 — технология передачи цифровых потоков по «медной» паре со скоростями (Рекомендация G.992.3 ITU-T) не менее 8 Мбит/с в сторону пользователя и 800 кбит/с в обратном направлении. Планируется, что скорость передачи в оборудовании ADSL2 будет достигать 12 Мбит/с на расстоянии до 1,5 км, а при использовании технологии инверсного мультиплексирования для ATM IMA скорость потока, направленного в сторону абонента по четырем «витым» парам, — 40 Мбит/с;
 - G.Lite2 (второе поколение G.Lite). Требования к технологии определены в Рекомендации G.992.4 ITU-T;
 - ADSL2+. Требования к технологии определены в Рекомендации G.992.5 ITU-T, принятой в феврале 2003 г. Увеличенная полоса используемых частот (до 2,2 МГц) позволит передавать данные со скоростью до 25 Мбит/с на расстояние около 1 км;
 - VDSL — технология передачи цифровых потоков по медной паре со скоростью до 52 Мбит/с в сторону пользователя на расстояние до 300 м. Стандартизация технологии пока не завершена. В последнее время широкое распространение получает технология Ethernet-over-VDSL (EoV).

7.2. Перспективы развития технологий xDSL. Требования к кабелям широкополосного доступа

Сейчас в корпоративном секторе наблюдается рост популярности услуг симметричного доступа. Наилучшие перспективы у стандартизированной (2001 г.) в ITU-T технологии SHDSL, намного превосходящей по техническим параметрам другие симметричные технологии xDSL.

Для сетей абонентского доступа в настоящее время наиболее широкое распространение получают асимметричные технологии DSL. Причем, если к мультиплексорам доступа к DSL (DSLAM) предъявляются жесткие требования, то основным критерием для выбора абонентского оборудования считается его низкая стоимость, что объясняется желанием провайдеров снизить затраты клиентов.

С нашей точки зрения российский рынок технологий DSL ожидает бурное развитие, связанное прежде всего с ростом спроса на них и естественным падением цен на эти услуги (табл. 7.1).

Таблица 7.1. Сравнительные характеристики технологий DSL

Тип DSL	Линейное кодирование	Количество используемых пар	Скорость, Мбит/с
HDSL	2B1Q или CAP	1,2 или 3	2
SDSL	2B1Q или CAP	1	от 0,384 до 2,3
SHDSL	TC-PAM	1 или 2	от 0,192 до 2,3
ADSL	DMT	1	до 0,8 — «восходящая» до 8 — «нисходящая»
VDSL	QAM или DMT	1	асимметричная технология: до 6,5 — «восходящая», до 52 — «нисходящая», симметричная — от 13 до 26

В будущем технологии xDSL станут доминирующими среди технологий, используемых пользователями. Общее количество соединений xDSL будет формироваться за счет предоставления высокоскоростного доступа в сеть Интернет и услуг кабельного телевидения, что позволит в ближайшее время обеспечить переход от эфирного приема местных ТВ-программ к их цифровой доставке со студийного комплекса, а также введение пакета цифрового телевидения.

Для полной реализации возможностей технологий DSL требуется соответствующая среда передачи — кабель широкополосного доступа.

Назначение кабелей

Кабель широкополосного доступа предназначен для работы на городских, корпоративных, сельских сетях связи для организации традиционной телефонной связи, широкополосного Интернет-доступа, многоканального цифрового телевидения, Интернет-телефонии, видеотелефонии, дистанционного обучения, системы охранной сигнализации, видеонаблюдения, сбора информационных данных.

Кабель должен обеспечить работу мультисервисной сети, объединяющей все существующие телекоммуникационные сети различного назначения Единой сети электросвязи России.

Кабели широкополосного доступа предназначены для создания сетей с применением оборудования:

- симметричных технологий DSL, использующих коды 2B1Q, CAP, TC-PAM и обеспечивающих передачу информации к абоненту и от абонента на одинаковых скоростях;

- асимметричных технологий ADSL, ADSL2, ADSL2+, использующих коды DMT и QAM и обеспечивающих передачу информации от стационарного устройства к абоненту (нисходящий поток) с большей скоростью и от абонента к стационарному устройству (восходящий поток) с меньшей скоростью.

Общие технические требования

Опыт внедрения симметричных и асимметричных технологий DSL на линиях местной связи показал, что достоверность передачи информации по среде передачи определяется рядом электрических требований, предъявляемых к кабелям в зависимости от параметров цифровых систем доступа.

Для разработки кабелей цифровых сетей доступа должны быть установлены основные сетевые параметры широкополосного доступа:

- область применения;
- тип аппаратуры, код;
- система организации связи (однокабельная, двухкабельная);
- количество пар, необходимых для передачи потока информации;
- требуемая длина линии;
- усилительная способность оборудования (перекрываемое затухание);
- особые условия эксплуатации.

7.3. Технические характеристики оборудования симметричных систем доступа DSL

Оборудование симметричных систем доступа, используемое на абонентском участке линий местной связи, обозначается общей аббревиатурой xDSL. К ним относятся малоканальные системы с 2B1Q-, CAP- и PAM-кодами.

Для технологий, предназначенных для симметричной передачи цифрового потока с переменной скоростью до 2,0 Мбит/с, использующих линейный код 2B1Q, принята аббревиатура MDSL, для кода CAP — MSDSL; для кода PAM — SDSL.

Симметричные системы цифрового уплотнения (xDSL) предназначены для работы по линиям из многопарных кабелей городской телефонной сети (ГТС) типа ТПЭп, ТППЭпЗ, ТГ.

Основные технические характеристики оборудования симметричных xDSL-технологий при двухпроводной организации связи и необходимые сведения для расчета конструкций кабеля ЦСП приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Основные технические характеристики оборудования симметричных xDSL-технологий

Тип аппаратуры	Число каналов	Код	Информационная скорость передачи, кбит/с	Расчетная частота, кГц	Усилительная способность, дБ
FlexGain PCM 4/5	4/5	2B1Q	336	63	44
FlexGain PCM 11/12	11/12	2B1Q	784	150	31
NTV-128 Voice	2 (телефон, факс, передача данных)	2B1Q	160	40	42
FlexDSL HDSL	30	2B1Q	2320	520	36
FlexDSL MDSL	$n \times 64$	CAP 8...128	144...2064	36...430	36
FlexDSL PAM (SHDSL)	$n \times 64$	TC-PAM	192...2300	34...343	46

7.4. Технические характеристики асимметричных технологий широкополосного доступа

В настоящее время наибольшее распространение на местных сетях связи получили технологии ADSL, использующие код DMT, обеспечивающие передачу информации по одной паре восходящего потока до 0,8 Мбит/с, исходящего — до 8,0 Мбит/с. Перспективными системами следует считать оборудование, выполненное по технологиям ADSL2 и ADSL2+.

Остановимся подробнее на их описании.

ADSL2. В июле 2002 г. ITU-T завершил работу над Рекомендациями G.992.3 и G.992.4, итогом которой стало появление двух новых стандартов для технологии ADSL с общим названием ADSL2. Рекомендация G.992.5 в январе 2003 г. была официально включена в семейство ADSL2 как технология ADSL2plus, или ADSL2+.

Технология добавляет новые функции асимметричных решений и предоставляет возможности для повышения производительности и улучшения совместимости служб и устройств ADSL.

Стандарт ADSL2 специально разрабатывался для увеличения битовой скорости и дальности действия ADSL. Битовые скорости «нисходящего» и «восходящего» потоков ADSL2 могут достигать 12 и 1 Мбит/с соответственно, за счет повышения эффективности модуляции, снижения перегрузок от кадрирования (framing overhead) и обеспечения усовершенствованных алгоритмов обработки сигналов.

Формирование кадров с программируемым числом избыточных разрядов позволяет сократить перегрузки кадрирования. В отличие от первых стандартов ADSL, где избыточные разряды были жестко фиксированы в кадре и занимали 32 кбит/с полезной нагрузки, в стандарте ADSL2 они могут программироваться и занимать от 4 до 32 кбит/с. Таким образом, избыточная битовая скорость может быть снижена до 4 кбит/с, что дает дополнительно 28 кбит/с для полезной нагрузки.

В среднем на длинных телефонных линиях ADSL2 будет обеспечивать увеличение битовой скорости приблизительно на 50 кбит/с для «восходящего» и «нисходящего» потоков. Последнее приведет к увеличению дальности примерно на 185 м, области покрытия — примерно на 6%, т.е. на 4 км.

Ранее основным препятствием для развертывания услуг ADSL были сложности с определением источника проблем в пользовательской службе ADSL. Для решения проблемы передатчики ADSL2 имеют улучшенные и расширенные диагностические функции.

Еще одно преимущество ADSL2 — улучшение питания. Приемопередатчики первого поколения ADSL работали в непрерывном режиме полной нагрузки по питанию даже если линия не использовалась. Существенно снизить электропотребление можно, реализовав в ADSL-модемах «дежурный/спящий» (standby/sleep) режим работы. Это также приведет к экономии мощности приемопередатчиков ADSL в небольших удаленных устройствах и шкафах операторов цифровой абонентской связи. Применяемый сегодня стандарт ADSL2 вводит несколько режимов управления питанием, которые снижают общее энергопотребление и сохраняют для пользователей возможность «постоянного подключения» (Always-on) устройств ADSL.

Перечислим другие дополнительные возможности и преимущества стандарта ADSL2:

- плавная адаптация битовой скорости в режиме реального времени;
- режим связывания (bonding) нескольких телефонных линий для повышения битовой скорости;
- поддержка голосовых каналов поверх DSL — Channelized Voice over DSL (CVoDSL) — транспортного метода, заимствующего прозрачность голосового трафика TDM в полосе частот DSL;

- быстрый запуск: ADSL2 имеет режим быстрого запуска (Fast Startup), сокращающий время инициализации с более 10 до менее 3 с;
- полноцифровой (all-digital) режим: ADSL2 допускает такой режим работы, который позволяет передавать данные ADSL в голосовой полосе частот, дополнительные 256 кбит/с. Эта функция полезна для компаний, получающих голосовые услуги и услуги данных по разным телефонным линиям.

ADSL2+. Согласование ADSL2+ было завершено ИТУ-Т в январе 2003 г., что привело к добавлению в семейство ADSL2-стандартов спецификации G.992.5. Технология ADSL2+ удваивает (по сравнению с ADSL2) полосу пропускания: с 1,1 до 2,2 МГц. Максимальные битовые скорости по телефонной линии при этом увеличиваются до 20 Мбит/с на расстоянии до 1500 м. «Восходящая» битовая скорость ADSL2+ равна примерно 1 Мбит/с в зависимости от состояния линии. Чипсеты ADSL2+ совместимы с ADSL и ADSL2, позволит операторам модернизировать свои сети для поддержки расширенного спектра услуг, например гибкой доставки видео, в рамках единого решения для коротких и длинных линий связи. Будут сохранены все функции и преимущества по производительности спецификации ADSL2 с обеспечением взаимодействия с унаследованным (устаревшим) оборудованием.

Технологию ADSL2+ можно применять для снижения перекрестных наводок, так как она позволяет реализовать только тоновые сигналы между 1,1 и 2,2 МГц за счет маскирования нисходящих частот менее 1,1 МГц. Это полезно, в частности, при совмещении в одном пучке большого количества служб ADSL, перекрестные наводки от которых могут существенно снизить битовую скорость на линии. ADSL2+ решает эту проблему за счет использования на некоторых соединениях частот ниже 1,1 МГц и 1,1–2,2 МГц — для остальных.

Высокоскоростная асимметричная и симметричная технология VDSL

VDSL (Very High bit-rate Digital Subscriber Line) — наиболее высокоскоростная технология DSL. Как и другие DSL-системы, использует более высокий частотный спектр, чем аналоговая телефония и ISDN, следовательно, это решение может применяться поверх уже существующих услуг POTS или ISDN. В табл. 7.3 приведены скоростные параметры VDSL.

Из таблицы видно, что существуют как симметричная, так и асимметричная реализация VDSL, а скорости данной технологии являются производными от канонической скорости SDH — 155,55 Мбит/с ($3 \cdot 51,84 = 4 \cdot 38,88 = 6 \cdot 25,92$ и т.д.).

Таблица 7.3. Скорости передачи технологии VDSL

Тип VDSL	«Нисходящая» скорость, Мбит/с	«Восходящая» скорость, Мбит/с
Асимметричная	51,84	6,48
	38,88	
	29,16	
	25,92	3,24
	22,68	
	19,44	
Симметричная	12,96	3,24
	25,92	–
	12,96	–

Асимметричная VDSL разработана для применения в самых разных областях: цифровое телевидение, видео по требованию (VoD), дистанционное обучение, телемедицина. Система имеет необходимую для телевидения высокой четкости (HDTV) полосу пропускания сигнала 18 Мбит/с. Однако в некоторых случаях целесообразнее использовать технологию ADSL2+ в сочетании с современными методами компрессии видеосигнала.

Симметричная технология VDSL применяется в корпоративной среде, где необходимы высокоскоростная передача данных, видеоконференцсвязь и телеконсалтинг.

В представленном на рынке оборудовании VDSL реализуются два различных метода линейного кодирования: QAM и DMT. Несмотря на то, что QAM VDSL проще, дешевле и пока имеет большее распространение, будущее, по-видимому, за DMT VDSL. Об этом позволяет говорить тот факт, что именно DMT-код был недавно утвержден в качестве единственного линейного кода для стандарта VDSL в Северной Америке, и рабочая группа IEEE 802.3ah Ethernet First Mile (Ethernet на «первой миле») приняла DMT в качестве стандарта для спецификации Ethernet over VDSL (EoVDSL).

Оборудование DSL для гибридного доступа: медь+оптика

Перспективным направлением развития широкополосного доступа является использование волоконно-оптических линий для предоставления услуг частным и корпоративным пользователям. Такое направление реализуется в концепции оптика до x (Fiber-To-The- x , FTT x).

Однако широкое внедрение этой концепции в сетях абонентского доступа сдерживается из-за медленного становления новых широкополосных мультимедийных сервисов.

тимедийных приложений и услуг, а также неготовности рынка к их потреблению. Когда оптические сети доступа получают достаточное развитие и распространение, востребованность услуг приобретет массовый характер и абоненты (как частные, так и корпоративные) смогут пользоваться широкополосными мультисервисными услугами за умеренную плату.

В настоящее время для предоставления пользователям широкополосных услуг используются смешанные медно-оптические сети доступа. Существует несколько концепций организации сети доступа смешанного типа. Одна из них — HFC (Hybrid Fiber Coaxial) — предполагает доведение оптики до точки концентрации. При этом распределительная абонентская сеть строится на основе коаксиальных кабелей. Данная архитектура не получила широкого распространения и используется только операторами кабельного телевидения.

Другая концепция, представляющая собой разновидность концепции FTTx, именуемая FTTB (Fiber To The Building — «волокно к зданию»), т.е. доведение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) до офиса. Согласно концепции FTTB распределение сигналов между абонентами внутри здания осуществляется по витым медным парам с использованием преимущественно VDSL.

Перечислим некоторые варианты концепции FTTx:

- FTTH (Fiber To The Home) — доведение ВОЛС до жилого дома;
- FTTP (Fiber To The Premises) — обобщенное понятие, объединяющее по сути варианты FTTH и FTTB;
- FTTO (Fiber To The Office) — понятие, аналогичное FTTB;
- FTTC (Fiber To The Curb) — доведение ВОЛС до места, в котором установлен распределительный шкаф;
- FTTCab (Fiber To The Cabinet) — понятие, аналогичное FTTC;
- FTTR (Fiber To The Remote) — доведение ВОЛС до удаленного модуля, концентратора;
- FTTOpt (Fiber To The Optimum) — доведение ВОЛС до оптимального, с точки зрения оператора, пункта.

Следует отметить, что варианты доступа FTTH и FTTB пока не получили широкого распространения. Связано это в основном с тем, что их реализация требует от операторов значительно больших инвестиций, чем построение DSL-инфраструктуры, поскольку для предоставления абоненту высокоскоростного канала (до нескольких Гбит/с) необходимо во много раз увеличить пропускную способность опорных сетей, протянуть ВОЛС до абонента, разработать немало новых приложений и, самое главное, убедить абонента платить за услуги. Поэтому многие операторы до сих пор стараются использовать имеющуюся меднокабельную инфраструктуру. Причем такая ситуация

характерна не только для России, но и для других европейских стран. Более того, многие операторы сознательно начинают развивать медно-кабельную инфраструктуру широкополосного доступа на основе нарождающегося нового поколения цифровых кабелей связи, на практике реализуя более приемлемые в современных условиях концепции FTTC, FTTCab, FTTR, FTTOpt.

7.5. Основные технические требования к кабелям широкополосного доступа

Сформулируем в конспективном систематизированном виде эти требования.

1. Кабели широкополосного доступа (КШД) предназначены для организации сети широкополосного доступа на местных сетях ЕСЭ РФ.
2. Кабели рассчитаны на применение оборудования симметричных и асимметричных технологий DSL, использующих коды 2B1Q, CAP, TC-PAM, DMT, QAM.
3. Электрические характеристики кабелей должны обеспечить передачу информации на одной паре на скоростях, регламентированных Рекомендациями ИТУ-Т: G.992.1, G.992.3, G.992.4, G.992.5 для оборудования технологии ADSL2+ (код DMT) до 20 Мбит/с при передаче сигналов в диапазоне частот до 2,2 МГц; для оборудования технологии VDSL до 51,84 Мбит/с в диапазоне частот до 4,0 МГц.
При разработке условий электромагнитной совместимости цепей ADSL и VDSL должна быть учтена организация многопроводной передачи до скорости 155,5 Мбит/с.
4. Протяженность линий широкополосного доступа должна быть не менее 1500 м.
5. Емкость кабеля 5...100 пар.
6. Диаметры токопроводящих жил (ТПЖ) 0,5; 0,64; 0,9 мм.
7. Изоляция ТПЖ на основе «пористых» технологий.
8. Конструктивно кабель должен обеспечивать прокладку в телефонной канализации, в грунт и внутри зданий, а также защиту от грызунов.
9. Кабель должен быть защищен от продольного проникновения влаги в сердечник. Для защиты сердечника кабеля от проникновения воды целесообразно применить «сухие» технологии водоблокирования.
10. Электрические характеристики кабелей на постоянном токе должны удовлетворять требованиям ГОСТ Р 51311–99.
11. При разработке конструкции кабеля должно быть предусмотрено применение новых материалов, обеспечивающих уменьшение затухания цепей и снижение себестоимости.

7.6. Обеспечение условий ЭМС для кабелей широкополосного доступа

Особенностью конструкции цифровых кабелей широкополосного доступа является обеспечение условий ЭМС при передаче цифровых сигналов симметричных и асимметричных DSL-технологий.

Для симметричных DSL-систем главным условием ЭМС является переходное затухание на ближнем конце

$$A_0 = a_3 + \alpha l + 10 \lg N,$$

где a_3 — защищенность сигнал/помеха, определяемая типом кода; αl — затухание цепи; N — количество цепей линии, уплотняемых оборудованием DSL.

Значения a_3 для различных кодов приведены ниже:

Код	HDB3	2B1Q	TC-PAM	CAP
a_3 , дБ	24,7	25,7	29	32

Требования к A_0 для строительных длин в 10-парном пучке кабеля при затухании линии DSL $a_{\text{раб}} = 31$ дБ на частоте 160 кГц должны соответствовать следующим значениям:

Код	2B1Q	TC-PAM	CAP
A_0 , дБ	66,2 дБ	69,5	72,5

Для асимметричных систем DSL, приемник которых размещен на дальнем конце линии, ключевым параметром условия ЭМС является переходное затухание на дальнем конце, дБ:

$$A_3 = a_3 + 10 \lg N.$$

Для случая когда в одном кабеле с оборудованием ADSL работают симметричные системы xDSL с кодом 2B1Q, величина переходного затухания на ближнем конце должна быть нормирована на частоте 160 кГц.

При оценке влияния между цепями, уплотненными оборудованием ADSL, ADSL2, нормирование A_3 должно осуществляться в диапазоне частот 138...1104 кГц, а оборудованием ADSL2+ — в диапазоне частот 138...2208 кГц.

Анализ результатов испытаний кабелей различных конструкций при загрузке их симметричными и асимметричными системами DSL, проведенных в кабельной лаборатории ЛОНИИС, показывает, что величина защи-

щенности a_3 , обеспечивающая передачу потока цифровой информации до 5 Мбит/с, составляет 50 дБ.

Тогда переходное затухание на дальнем конце может быть определено по формуле

$$A_3 = 50 + 10 \lg N. \quad (7.1)$$

Для обеспечения максимальной скорости передачи допускается не более пяти снижений A_3 относительно нормированного ее значения на величину не более 5 дБ во всем рабочем диапазоне частот.

Нормирование параметров влияния для цепей, уплотняемых оборудованием VDSL, должно осуществляться в диапазоне частот до 4 МГц. Величина защищенности на дальнем конце определяется по формуле (7.1). При этом $a_3 = 40$ дБ, а допустимая величина снижений A_3 должна быть не более 8 дБ.

Раздел 4

КОНСТРУИРОВАНИЕ КАБЕЛЕЙ СКС И ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА НА ЭТАПЕ СОЗДАНИЯ ЕСЭ РФ

Глава 8. Общие требования к конструктивным и электрическим характеристикам кабелей СКС и широкополосного доступа

8.1. Конструкции кабелей СКС

Кабели на основе витых пар с медными жилами широко применяются в СКС для передачи электрических сигналов. Они относятся к категории симметричных кабелей: UTP, STP, S/UTP, S/STP [29].

Кабели СКС и кабели связи с медными проводниками применяются для передачи электрических сигналов. Любой рассматриваемый кабель для СКС содержит одну или несколько скрученных с различными согласованными и некратными друг другу шагами витых пар проводов и по существующей классификации относится к симметричным кабелям парной скрутки. Скрутка пары в кабелях СКС только однонаправленная.

В табл. 8.1 приведены для примера согласованные шаги, мм, для четырехпарных кабелей СКС категории 5, применяемые в конструкциях различных иностранных фирм.

Таблица 8.1. Параметры четырехпарных кабелей СКС категории 5

Фирма	Пара 1, мм	Пара 2, мм	Пара 3, мм	Пара 4, мм
General Cable	14	17	12	20
BICC	18	15	20	12
Belden	25	20	16	32
Lucent Technologies	15	13	20	24
Mohawk/CDT	25	17	28	20

В кабелях связи скрутка группы осуществляется либо способом четверочной, либо парной скрутки.

Изоляция токопроводящих жил кабелей связи и кабелей СКС может быть сплошной и вспененной.

Скрутка сердечника кабелей может осуществляться различными способами. Но главным из них считается метод пучковой скрутки. При этом элементарные пучки и сердечник кабеля могут скручиваться однонаправленным или разнонаправленным способом.

Все кабели могут иметь некоторые дополнительные защитные, экранирующие и технологические элементы, наличие, количество и качество которых, главным образом, определяется предназначением той или иной кабельной конструкции. К таким элементам относятся поясная изоляция, различного типа экраны, бронепокровы, водоблокирующие элементы, гидрофобные наполнители, оболочки и шланги из различных материалов и т.п.

Как было сказано выше, конструкции кабелей СКС на основе витых пар подразделяются на четыре наиболее важных вида:

- горизонтальный кабель;
- многопарный кабель;
- кабель для шнуров;
- провод для перемычек.

Большинство кабелей СКС предназначены для обеспечения связи внутри зданий. Эта их особенность диктует свои требования к конструкции. Как правило кабели СКС не имеют защиты от проникновения влаги внутрь сердечника. Отсутствуют также бронепокрытия и другие элементы, связанные с условиями прокладки и эксплуатации, что особенно характерно для кабелей связи.

Горизонтальный кабель применяется в горизонтальной подсистеме на участке от коммутационного оборудования в кроссовой этажа до информационных розеток рабочих мест. Кабель укладывается на трассе в горизонтальном положении с минимальным количеством вертикальных участков.

Наиболее распространенная на практике конструкция содержит четыре витых пары. Допускается применение двухпарных кабелей. Этот вариант при лучших массогабаритных показателях имеет меньшую стоимость и достаточно широко распространен. Однако его применение существенно ограничивает функциональные возможности кабельной системы и, в частности, не позволяет передавать сигналы новейших перспективных приложений.

Варианты конструкций горизонтальных кабелей достаточно подробно изложены в [29].

Многопарный кабель используется в основном в магистральных подсистемах СКС для организации связи между помещениями кроссовых. Основанием для отнесения кабеля к группе многопарных является наличие у него более четырех витых пар. Общий отличительный признак многопарной конструкции – отсутствие в структуре кабельного сердечника каких-либо оболочек, индивидуальных для отдельных пар или четверок. Возможен вариант конструкции многопарного кабеля, когда кабельный сердечник образуют не отдельные витые пары, а двух- или четырехпарные элементы, аналогичные по конструкции горизонтальному кабелю и снабженные индивидуальной защитной оболочкой.

Конструкция многопарного кабеля зависит от его емкости. Если емкость составляет до 25 пар, в составе кабельного сердечника какие-либо дополнительные элементы обычно не предусматриваются (рис. 8.1, а). При емкости свыше 25 пар последние разбиваются на пучки по 25 пар в каждом, совокупность которых образует кабельный сердечник (рис. 8.1, в). Для увеличения прочности и устойчивости к различным механическим воздействиям в качестве основы сердечника многопарного кабеля может применяться центральный стеклопластиковый прут.

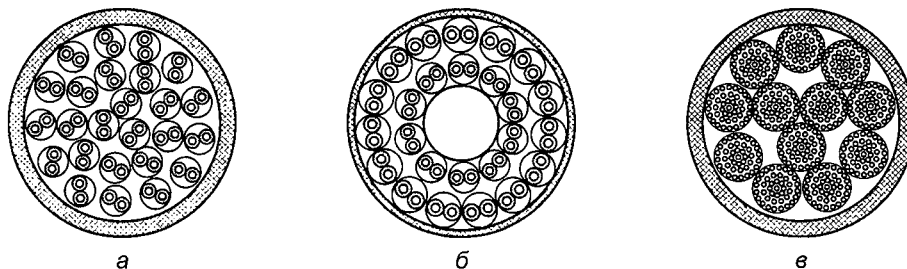


Рис. 8.1. Многопарные магистральные кабели СКС:
 а — 25-парный кабель категории 5 традиционной конструкции;
 б — то же с центральным силовым элементом;
 в — 300-парный кабель категории 3

Многопарные кабели подразделяются на кабели внутренней и внешней прокладки. Наиболее важным отличием кабеля внешней прокладки является применение специальных мер и конструктивных решений по защите кабельного сердечника от попадания в него влаги. В качестве таких решений можно выделить заполнение сердечника кабеля специальными гидрофобными наполнителями, а также применение различных водоблокирующих конструкций в виде нитей и пленок. Многопарные кабели могут иметь дополнительную защиту в виде брони из алюминиевой или стальной гофрированной ленты. Мно-

гопарные кабели СКС производятся в основном для внутренней прокладки. Однако интерес представляют кабели, удовлетворяющие требованиям категории 5, предназначенные для внешней прокладки. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать конструкции кабелей, имеющие все необходимые элементы, позволяющие их относить к классу кабелей широкополосного доступа.

Кабель для шнуров предназначен для изготовления коммутационных и оконечных шнуров. В большинстве случаев содержит четыре витых пары, по конструкции похож на горизонтальный кабель. Возможны также одно-, двух- и трехпарные варианты кабелей для шнуров, используемые главным образом для обеспечения функционирования телефонных приложений.

Наиболее существенное отличие кабелей для шнуров от горизонтальных кабелей заключается в том, что для придания кабелю большей устойчивости к многократным изгибам и продления срока эксплуатации проводники выполняются из нескольких тонких перевитых медных проволок (многопроволочная конструкция), а также материалов с повышенной гибкостью.

Провод для перемычек, или кроссировочный провод в большинстве случаев представляет собой одну неэкранированную витую пару без внешней защитной оболочки. Проводники производятся из монолитной медной проволоки с поливинилхлоридной изоляцией.

Наряду с однопарным кроссировочным проводом существуют также его варианты: двухпарный, трехпарный и четырехпарный. Структура такого провода формируется скруткой его витых пар друг с другом.

В настоящее время на рынке СКС предлагается ряд кабелей, характеристики которых существенно превышают требования стандартов категории 5. В этих кабелях для уменьшения затухания диаметр медной жилы проводника увеличивается до 0,55–0,6 мм и используются изоляционные покрытия с уменьшенными диэлектрическими потерями, в частности из вспененных материалов. Работы по повышению значения верхней граничной частоты горизонтального кабеля (*NEXT*) ведутся в двух направлениях (рис. 8.2).

Первое направление основано на сохранении структуры сердечника в процессе прокладки и эксплуатации за счет введения в состав кабельного сердечника дополнительного элемента, выполняющего функции его силовой основы. В качестве такого элемента может быть использован центральный пластиковый пруток или полиэтиленовый профилированный элемент в форме четырехлучевой звезды в поперечном сечении (рис. 8.3).

В конструкциях кабелей с центральным сепаратором при укладке каждой пары в индивидуальный паз происходит их дополнительный разнос друг от друга, что сопровождается заметным увеличением параметра *NEXT* и соответственно защищенности от переходной помехи на ближнем конце (*ACR*).

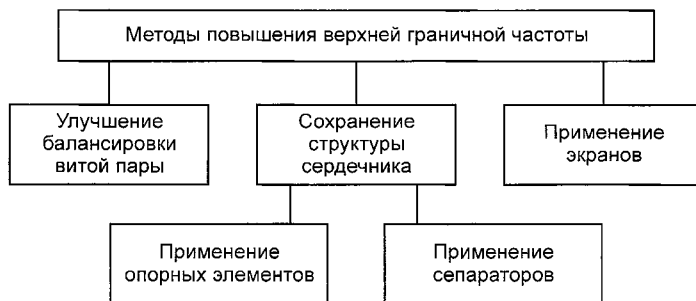


Рис. 8.2. Технические решения по повышению верхней граничной частоты горизонтального кабеля

Сепаратор подавляющего большинства конструкций представляет собой отдельный элемент конструкции. Существует и другое решение, а именно формирование сепаратора в момент нанесения на кабель общей оболочки за счет выбора специальной головки экструдера.

Второе направление служит для поддержки высокой точности балансировки «витых» пар, т.е. шага скрутки. Для этого тщательно контролируется шаг скрутки проводников в процессе изготовления кабеля в сочетании с некоторым его уменьшением по сравнению с конструкциями кабеля категории 5. Некоторые фирмы применяют склейку проводников пары. Последнее гарантирует высокую стойкость кабеля к различного рода изгибам с малым радиусом, однако в определенной степени усложняет разделку в оконечных розетках и на кроссовой панели.

Определенный выигрыш по величине параметра *NEXT* обеспечивается разнесом отдельных витых пар друг от друга. Это достигается отказом от традиционной круглой внешней оболочки и применением оболочки с формой поперечного сечения, близкой к овальной, так называемый *плоский кабель* (рис. 8.4)

Особое внимание в настоящее время уделяется ужесточению допусков на возможные изменения диаметра токопроводящей жилы и ее эксцентриситета относительно изоляции в процессе производства. Увеличение рабочих частот горизонтальных кабелей СКС, на наш взгляд, возможно только на экранированных конструкциях.

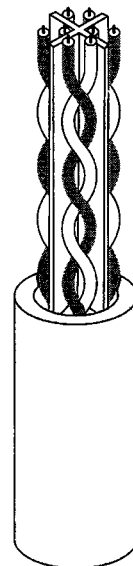


Рис. 8.3. Конструкция горизонтального кабеля с центральным сепаратором

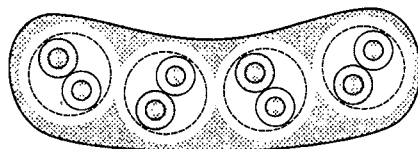


Рис. 8.4. Плоский кабель типа Media Twist компании Belden

Существенно более жесткие требования к технологии производства к таким кабелям вызывает заметный рост стоимости продукта (примерно на 30% по сравнению со стандартным кабелем категории 5. Тем не менее многие производители ведут усиленный поиск способов снижения себестоимости кабелей с улучшенными характеристиками именно в контексте их применения на сетях широкополосного доступа.

8.2. Материалы изоляции проводников

В качестве материалов для изоляции проводников в кабелях категории 3 обычно применяют поливинилхлорид, в кабелях категорий 5...7 — материал с улучшенными электрическими характеристиками (полиэтилен, пропилен). Применяются как сплошные, так и вспененные материалы. Радиальная толщина изоляции — 0,2 мм.

В табл. 8.2 приведен перечень материалов, применяемых в кабелях зарубежных конструкций.

Таблица 8.2. Материалы, применяемые в кабелях СКС

Материал	Латинское сокращение	Диэлектрическая проницаемость	Рабочий диапазон температур, $t^{\circ}\text{C}$
Поливинилхлорид	PVC	4,0–5,0	–40...+85
Полипропилен	PP	2,4	–10...+100
Полиэтилен	PE	2,3	–55...+85
Ячеистый полиэтилен (пористый полиэтилен)	–	1,2	–55...+85
Ячеистый полиэтилен с оболочкой (пленко-пористый полиэтилен)	Foam Skin FE	1,5	–55...+85
Тефлон	FEP, PTFO, PFA	2,0	–190...+260

В разработке отечественных конструкций кабеля СКС представляет интерес применение пористых технологий при изготовлении изоляции жил. Коэффициент пористости, определяемый как отношение объема воздушных включений в общему объему образца, у пористой изоляции материала может достигать 0,8.

8.3. Внешние оболочки

Для внешней оболочки наряду с обычным поливинилхлоридом применяют материалы, не содержащие галогенов, не поддерживающие горение, а также малодымные полимеры.

Внешняя оболочка, как правило, окрашивается в серый цвет различных оттенков. Встречаются также другие стандартные для конкретного производителя цвета (синий, фиолетовый, белый, красный). Оранжевая окраска указывает на то, что оболочка изготовлена из негорючего материала и кабель может быть использован для прокладок в так называемых *Pienum-полостях*. Конструкции, предназначенные для внешней прокладки, имеют полиэтиленовый шланг. При этом из соображения сохранения единства технологического процесса и конструкции сердечника внешний шланг из полиэтилена накладывается дополнительно поверх поливинилхлоридной оболочки.

На внешнюю оболочку наносятся маркирующие надписи, в которых указываются тип кабеля, диаметр и тип проводников, характеристика оболочки, наименование производителя, фирменные обозначения кабеля, а также стандарта.

8.4. Экранированные горизонтальные кабели

В зависимости от наличия или отсутствия дополнительных экранирующих покрытий отдельных витых пар и/или сердечника в целом горизонтальные кабели из витых пар подразделяются на экранированные и неэкранированные. Среди экранированных конструкций следует выделить кабели с общим внешним экраном, с экранами для каждой пары и с одновременным экранированием отдельных пар и сердечника в целом.

Экранирование в кабелях СКС применяют для повышения переходного затухания на ближнем и дальнем концах, помехозащищенности, а также снижения уровня электромагнитного излучения (ЭМИ). Известны различные конструкции кабелей (табл. 8.3).

Таблица 8.3. Конструкции кабелей СКС

Условное обозначение		Экран	Цель экранирования
основное	альтернативное		
S/UTP	ScTP, FTP	Общий экран для всех пар	Снижение уровня ЭМИ Повышение защищенности от внешних помех
S/STP	STP, S-STP	Экранирование каждой пары, плюс внешний экран вокруг всех пар	Снижение уровня ЭМИ Повышение защищенности от внешних помех Повышение переходного затухания Увеличение механической прочности

Кабели S/UTP используются при построении горизонтальной подсистемы СКС при значительных внешних наводках (производственные цехи и другие помещения с источниками сильных электромагнитных полей) или при повышенных требованиях к безопасности кабельной системы (защита от несанкционированного доступа).

S/STP-кабели по сравнению с STP-кабелями обладают лучшими характеристиками по защите от внешних помех и уровню ЭМИ; переходное затухание между парами 10...15 дБ позволяет обеспечить выполнение технических требований кабелей категорий 5е и 6.

Сравнительные характеристики некоторых механических и эксплуатационных параметров кабелей СКС приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Характеристики параметров кабелей СКС

Тип кабеля	UTP		STP	S/UTP	S/UTP	S/STP
	категория 5	категория 6	плечочный		комбинированный экран	
Масса, кг/км	30...33	34...37	42	49	65...85	82...88
Внешний диаметр, мм	4,9	5,2	5,4	6,2	7,6	8,0
Радиус изгиба, мм	30...35	30...35	30...33	35...40	40...45	40...45
Рабочий диапазон температур, °С	-20...+60...70					

8.5. Кабели ГТС с полиэтиленовой изоляцией жил в пластмассовой оболочке

Последнее десятилетие большое внимание уделялось совершенствованию конструкции и технологии многопарных кабелей местной связи. Появилось целое семейство новых конструкций кабелей с полиэтиленовой изоляцией жил и полиэтиленовой оболочкой. Значительно расширилась номенклатура кабелей с гидрофобным заполнением сердечника, улучшилась технология их изготовления, обеспечивающая полную влагозащиту кабеля. Разработаны и широко внедряются конструкции кабелей с изоляцией жил на основе «пористых» технологий и с гидрофобным заполнением сердечника. На некоторых предприятиях начинаются работы по созданию конструкций кабелей с внедрением водоблокирующих элементов. Расширена номенклатура кабелей для прокладки внутри АТС и зданий, обладающих пониженной горючестью [7].

Значительное внимание уделено конструкциям кабелей для прокладки непосредственно в грунт с различными бронепокровками. Предусмотрена конструкция кабелей для применения в условиях, характеризующихся повышенным электромагнитным влиянием. С 01.07.2000 г, введен в действие новый Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51311–99 «Кабели телефонные с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке» [15]. Марки, наименование и преимущественные области применения кабелей приведены в табл. 8.5

Таблица 8.5. Область применения кабелей ГТС

Марка кабеля	Наименование кабеля	Преимущественная область применения
ТПШЭп	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты, в полиэтиленовой оболочке	Для прокладки в телефонной канализации, коллекторах, шахтах, по стенам зданий и для подвески на воздушных линиях связи
ТПШЭпЗ	То же с гидрофобным заполнением	То же в условиях повышенной влажности
ТПппЗП	Кабель телефонный с пленко-пористой полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты, в полиэтиленовой оболочке, с гидрофобным заполнением	То же

Продолжение таблицы 8.5

Марка кабеля	Наименование кабеля	Преимущественная область применения
ТППэлБ	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты, в полиэтиленовой оболочке, бронированный стальными лентами, с наружным защитным покровом	Для прокладки в грунтах всех категорий, не характеризующихся повышенной коррозионной активностью по отношению к стальной броне, не подверженных мерзлотным деформациям
ТППэлЗБ	То же с гидрофобным заполнением	То же в условиях повышенной влажности
ТППэлБГ	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты, в полиэтиленовой оболочке, бронированный стальными лентами с противокоррозионным покрытием	Для прокладки в коллекторах, тоннелях, шахтах
ТППэлББГ	То же с броней, наложенной «в замок»	То же
ТППэлББШп	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты, в полиэтиленовой оболочке, бронированный стальными лентами, с наружным защитным шлангом из полиэтилена	Для прокладки в грунтах всех категорий (кроме механизированной — в скальных грунтах), не подверженных мерзлотным деформациям
ТППэлЗБШп	То же, с гидрофобным наполнением	То же в условиях повышенной влажности
ТППэлпт	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты в полиэтиленовой оболочке, со встроенным тросом	Для подвески на опорах
ТПВ	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюминиевой или алюмополимерной ленты, в оболочке из поливинилхлоридного (ПВХ) пластика	Для прокладки по внутренним стенам зданий и внутри помещений
ТПВнг	То же в оболочке из ПВХ пластика пониженной горючести	То же и для прокладки в пучках
ТПВБГ	Кабель телефонный со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюминиевой или алюмополимерной ленты, в оболочке из поливинилхлоридного (ПВХ) пластика, бронированный стальными лентами с противокоррозионным покрытием	Для прокладки внутри помещений, в сухих тоннелях

Конструкция приведенных кабелей достаточно подробно изложена в [6]. Основное отличие этих конструкций городских кабелей от кабелей СКС заключается в том, что они проектировались и изготавливались для низкочастотной телефонии и в связи с этим не предполагалось их применение на цифровых сетях и тем более сетях широкополосного доступа. Вместе с тем, «запас прочности» этих кабелей достаточен для их применения на цифровых сетях, а элементы конструкции этих кабелей могут быть применены при конструировании кабелей широкополосного доступа.

Глава 9. Основные положения теории передачи, взаимных влияний и экранирования в кабелях связи

Универсальные кабели широкополосного доступа (КШД) представляют собой экранированные кабели различных конструкций, поэтому в предлагаемом издании будет рассматриваться этот частный случай направляющей среды передачи. За теоретическую основу авторами приняты положения, изложенные в [1, 2, 6, 9].

При создании универсальных кабелей, пригодных для использования в сетях широкополосного доступа ЕСЭ, возникает проблема оценки и выбора конструкции экранов, обеспечивающих функционирование современного цифрового оборудования в условиях массового внедрения.

Особое значение приобретает новая постановка вопроса обеспечения информационной безопасности.

В связи со сказанным задача экранирования кабелей рассматривается в двух аспектах:

- экранирование от внешних электромагнитных воздействий и обеспечение защиты от излучения во внешнюю среду;
- экранирование цепей кабелей от воздействия электромагнитных полей внутри сердечника среды передачи.

Эти две задачи должны быть решены в едином комплексе при разработке конструкций универсальных КШД с учетом специфики их использования (диапазон частот, системы кодирования, применяемого в оборудовании цифрового уплотнения, условий прокладки).

Поставленная многоплановая задача очень сложна и многофункциональна. Потребуется решение практических задач конструирования и использования кабелей с учетом новых материалов, оборудования и технологий изготовления.

Постановка задачи. Развитие сетей ЕСЭ, включающей максимальное использование существующих сетей электросвязи и внедрение новых технических решений на базе кабелей с медными жилами, ставит задачу конструирования универсальных кабелей связи.

Главная особенность таких кабелей — диапазон использования, что связано с выбором конструкций экранов. Так как конструкции сердечника этих

кабелей и кабеля СКС (витая пара) аналогичны, диапазон использования первых должен соответствовать категориям 5, 5е, 6, 7.

Итак, диапазоны применения кабелей сети широкополосного доступа до 4 МГц обеспечивают функционирование оборудования ADSL, ADSL2, ADSL2+, VDSL со скоростями передачи 6,144; 8,0; 25,0; 52,0 Мбит/с соответственно.

Условная прокладка — внешняя среда (телефонная канализация, подземная прокладка, подвеска). Протяженность линий — 1,5...2,0 км.

Сети СКС. Внутридомовые сети интеллектуальных зданий имеют диапазон частот — 100, 250, 600 МГц.

Учитывая область применения универсальных кабелей СКС-КШД, следует рассмотреть следующие типы экранирования:

- экранирование от внешних воздействий (экранирование сердечника кабеля);
- экранирование пар в кабеле, обеспечивающих отсутствие переходных помех от соседствующих цепей.

При этом следует рассматривать вопросы взаимных влияний между цепями с учетом типов скрутки пар и их шагов.

В требованиях к экранированным кабелям необходимо учитывать систему организации связи и особенности технических характеристик оборудования.

9.1. Общие положения

К отличительной особенности КШД относится наличие нескольких цепей, состоящих из двух проводников с одинаковыми конструктивными и электрическими свойствами. Они используются для передачи энергии в диапазоне частот $0...10^8$ Гц и более. Конструктивные размеры КШД таковы, что в этом диапазоне частот внутренний диаметр общей для всех цепей металлической оболочки (экрана) во много раз меньше длины волны, поэтому передача энергии возможна на поперечной электромагнитной волне ТЕМ.

КШД соответствующей конструкции могут применяться для подсистем на транспортных сетях внутризоновой, магистральной и местной связи. Цепи этих кабелей оборудуются аппаратурой многоканальных систем передачи. Принципиальное качественное отличие таких кабелей заключается не столько во внешних конструктивных особенностях, сколько в точности изготовления, совершенстве технологии, жесткости допусков, что в комплексе обеспечивает достижение высоких электрических характеристик кабеля в широком диапазоне частот: низкого коэффициента затухания, малых зна-

чений коэффициентов емкостной и магнитной связи, незначительных разбросов рабочей емкости пар, высоких значений переходного затухания и защищенности на строительных длинах.

Теория среды передачи по кабелям с медными жилами базируется на решении основных уравнений электродинамики — уравнений Максвелла для гармонических колебаний [19]. Применяется единый подход к распространению магнитных и электрических полей в поперечном сечении и вдоль линий. Для исследуемого диапазона частот, когда длина волны несоизмеримо больше габаритов экрана, пренебрегают токами смещения (т.е. излучением), и все процессы рассматриваются в квазистационарном режиме.

Одной из задач, стоящих перед авторами, была разработка методики расчета КШД, обязательный элемент которых — наличие металлического экрана. Поэтому изложение теоретических исследований будет касаться в основном экранированных кабелей.

Как известно, электромагнитный экран, защищая цепи сердечника кабеля от помех, одновременно существенно воздействует на собственные параметры экранированных элементов (цепей), перераспределяя внутреннее электромагнитное поле и изменяя условия прохождения сигналов по данным цепям. Такое явление обусловлено реакцией экрана, которая приводит к изменению собственных параметров экранирования пар. Изменяются как параметры передачи цепей (R, L, C, G), так и параметры влияния, к которым относятся электрические ($K = g + i\omega c$) и магнитные ($M = r + i\omega t$) связи.

Воздействие экрана на электрические характеристики цепей, заключенных в экран, может быть определено с помощью коэффициента реакции экрана P . Электромагнитный экран характеризуется двумя параметрами: коэффициентом экранирования S , характеризующим степень и основные закономерности изменения электромагнитного поля вне экрана, и коэффициентом реакции P , определяющим степень и основные закономерности изменения электромагнитного поля внутри экрана. Оба параметра органически взаимосвязаны и могут быть математически рассчитаны один из другого. Только совместное рассмотрение обоих факторов S и P может дать должное представление о процессах экранирования исследуемой системы и позволить выбрать оптимальную конструкцию электромагнитного экрана. Это особенно важно для тех КШД, где большое количество цепей расположено в непосредственной близости от экрана и испытывает его электромагнитное воздействие.

Параметр S учитывает экранирующую способность системы и степень уменьшения поля помех при влиянии одной электромагнитной цепи на другую. Параметр P позволяет исследовать отражение от поля экрана и степень

его воздействия на собственные электрические характеристики цепей внутри экрана.

Эффект реакции на собственные параметры цепей, находящихся внутри экрана, может быть как отрицательным, так и положительным. При определенных условиях и конструктивных параметрах экранов их реакция может улучшить электрические характеристики экранированных элементов. Поэтому при конструировании экранов следует стремиться получить максимальный экранирующий эффект и наивыгоднейшие параметры реакции экрана.

В соответствии с [1] коэффициент экранирования S характеризуется выражением

$$S = \frac{1}{\operatorname{ch} kt} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{\text{д}}}{Z_{\text{м}}} + \frac{Z_{\text{м}}}{Z_{\text{д}}} \right) \operatorname{th} kt}, \quad (9.1)$$

а коэффициент реакции экрана

$$P = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{Z_{\text{д}}}{Z_{\text{м}}} - \frac{Z_{\text{м}}}{Z_{\text{д}}} \right) \operatorname{th} kt}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_{\text{д}}}{Z_{\text{м}}} + \frac{Z_{\text{м}}}{Z_{\text{д}}} \right) \operatorname{th} kt}, \quad (9.2)$$

где $Z_{\text{д}}$ — волновое сопротивление диэлектрика; $Z_{\text{м}}$ — волновое сопротивление металла; t — толщина экрана; $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых токов.

9.2. Сравнение процессов экранирования и процессов передачи энергии по электрическим цепям КШД

Физическая сущность явлений, происходящих в электромагнитных экранах, во многом схожа с процессами в электрических цепях при распространении энергии по однородным линиям с несогласованными нагрузками. Представляет некоторый интерес сравнение методов расчета экранов, базирующихся на решении основных уравнений электродинамики, с методами расчетов, применяемых в электротехнике и в теории электрической связи (рис. 9.1).

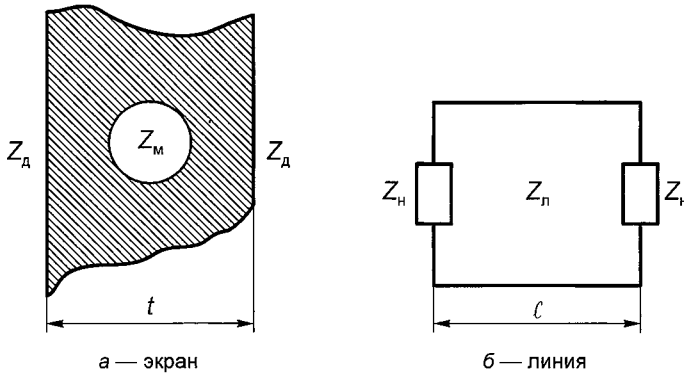


Рис. 9.1. К сравнению методов расчета экранов и цепей

Преобразуем (9.1) и (9.2).

В технике связи и радиоэлектронике принято оценивать экраны не через коэффициент экранирования S , а через затухание экранирования A_3 , характеризующее величину затухания (в дБ или неперах, Н), вносимое экраном ($1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Н}$; $1 \text{ Н} = 8,686 \text{ дБ}$):

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{1}{S} \right| \text{ дБ, или } A_3 = \ln \left| \frac{1}{S} \right| \text{ Н.}$$

Тогда

$$A_3 = A_n + A_0 = \ln \left| \frac{1}{S} \right| = \ln \left| \text{ch } kt \left[1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \text{th } kt \right] \right|; \quad (9.3)$$

$$P = \frac{\frac{1}{2} \left(N - \frac{1}{N} \right) \text{th } kt}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \text{th } kt},$$

где $N = Z_n / Z_m$.

Переходя от записи в гиперболических функциях к показательным функциям, получим значение A_3 в следующем виде:

$$A_3 = \ln \left| \frac{e^{kt}}{4} \left(2 + N + \frac{1}{N} \right) + \frac{e^{-kt}}{4} \left(2 - N - \frac{1}{N} \right) \right| = \ln \left| e^{kt} \frac{(N+1)^2}{4N} - e^{-kt} \frac{(N-1)^2}{4N} \right|.$$

Заменяя N через значения волновых сопротивлений и преобразуя выражение, получим

$$A_3 = \ln \left| e^{kt} \left(\frac{Z_{\text{Л}} + Z_{\text{М}}}{2\sqrt{Z_{\text{Л}}Z_{\text{М}}}} \right)^2 - e^{-kt} \left(\frac{Z_{\text{Л}} - Z_{\text{М}}}{2\sqrt{Z_{\text{Л}}Z_{\text{М}}}} \right)^2 \right|.$$

Вынося первый член за скобки и почленно логарифмируя, имеем

$$A_3 = \frac{kt}{\sqrt{2}} + 2 \ln \left| \frac{Z_{\text{Л}} + Z_{\text{М}}}{2\sqrt{Z_{\text{Л}}Z_{\text{М}}}} \right| + \ln \left| 1 - \left(\frac{Z_{\text{Л}} - Z_{\text{М}}}{Z_{\text{Л}} + Z_{\text{М}}} \right)^2 e^{-2kt} \right|. \quad (9.4)$$

Эта формула полностью соответствует формуле расчета рабочего затухания цепи с несогласованными нагрузками, широко применяемой в теории электрических цепей:

$$a_p = \alpha l + 2 \ln \left| \frac{Z_A + Z_B}{2\sqrt{Z_A Z_B}} \right| + \ln \left| 1 - \left(\frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \right)^2 e^{-2\gamma l} \right|,$$

где Z_B, Z_A — волновые сопротивления линии и нагрузки соответственно; l — длина линии; γ — коэффициент распространения.

Эта формула состоит из трех слагаемых, где первое слагаемое — собственное затухание линии (αl), второе — дополнительное затухание отражения вследствие несогласованности сопротивлений нагрузок с сопротивлением линий, третье — дополнительное затухание отражения из-за взаимодействия несогласованностей в начале и в конце последующих составляющих волн.

Формула для вычисления коэффициента реакции экрана может быть преобразована следующим образом:

$$P = \frac{\frac{1}{2} \left(N - \frac{1}{N} \right) \text{th} kt}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \text{th} kt} = \frac{(N-1)(N+1)(e^{kt} - e^{-kt})}{(N+1)^2 e^{kt} - (N-1)^2 e^{-kt}}.$$

Подставляя $N = Z_{\text{Л}}/Z_{\text{М}}$, получим

$$P = \frac{Z_{\text{Л}} - Z_{\text{М}}}{Z_{\text{Л}} + Z_{\text{М}}} \frac{e^{kt} - e^{-kt}}{e^{kt} - e^{-kt} \left(\frac{Z_{\text{Л}} - Z_{\text{М}}}{Z_{\text{Л}} + Z_{\text{М}}} \right)^2}.$$

При значительном поглощении энергии экраном, когда $kt > 3$ (отражение энергии не превышает 5%), имеем

$$P = \frac{N-1}{N+1} = \frac{Z_d - Z_m}{Z_d + Z_m}. \quad (9.5)$$

Это и есть значение коэффициента отражения, широко используемое для исследования неоднородностей в электрических цепях, в том числе и в цифровых кабелях.

Физическая сущность рассматриваемых явлений экранирования и полученная математическая аналогия позволяют сделать следующие выводы.

Процесс прохождения электромагнитной энергии через экран аналогичен процессу распространения энергии вдоль электрической цепи. Разница заключается в том, что в линиях исследуется энергия передачи, а в экранах — энергия влияния. При исследовании экранов рассматривается распространение энергии не вдоль линии, а перпендикулярно ей, от источника возмущения (цепи) к экрану и далее через экран в экранированное пространство.

Так же, как при распространении электромагнитной энергии вдоль неоднородной линии, так и при движении в радиальном направлении приходится считаться с двумя факторами: затуханием энергии в металлической толще экрана и затуханием отражения на границах диэлектрик–экран–диэлектрик. Электромагнитная энергия, достигнув экрана, частично проходит через него, несколько затухая при этом, а частично отражается на первой границе диэлектрик–экран. На границе экран–диэлектрик часть энергии опять отражается, а часть проникает на экран.

При передаче энергии по проводам эффект отражения крайне не желателен, а при экранировании наличие этого эффекта дает положительный результат. Чем сильнее отражение энергии на границах диэлектрик–экран–диэлектрик, тем меньшая часть энергии проникает в экранированное пространство.

Для экрана с большим затуханием ($kt > 3$) формула экранирования примет вид

$$S = \frac{1}{\frac{1}{2} e^{kt} \left[1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \right]},$$

и соответственно экранное затухание будет

$$A_s = \ln \left| \frac{1}{S} \right| = \ln \left| e^{kt} \left[1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \right] \right|.$$

Эта формула может быть приведена к виду, принятому для расчета электрических цепей

$$A_3 = \ln \left| e^{kt} \frac{(N-1)^2}{4N} \right| = \frac{|k|}{\sqrt{2}} t + 2 \ln \left| \frac{Z_d + Z_m}{2\sqrt{Z_d Z_m}} \right|. \quad (9.6)$$

Результат имеет вполне убедительную физическую трактовку. При экране с большим затуханием экранное затухание будет состоять лишь из затухания энергии за счет поглощения энергии в металле (1-й член) и затухания за счет отражения на границах (2-й член). Третий член формулы (9.4), характеризующий экранное затухание, происходящее за счет многократных отражений последующих составляющих, здесь не участвует. Это объясняется тем, что в таком экране последующие составляющие не могут повлиять на величину экранирующего действия, так как вследствие большого затухания величина их очень мала.

9.3. Принцип действия магнитных и немагнитных экранов

Магнитные экраны при постоянном токе и в области низких частот действуют как магнитоэлектрические по принципу замыкания магнитного поля в толще экрана вследствие его повышенной магнитопроводности ($\mu = 100$ и выше). С ростом частоты возрастает роль вихревых токов, происходит вытеснение магнитного поля из толщи экрана, и его повышенная магнитопроводность теряет свое значение. Экран переходит в электромагнитный режим работы и действует так же, как и немагнитный экран за счет вихревых токов в толще экрана.

Немагнитные экраны во всем частотном диапазоне действуют как электромагнитные, т.е. по принципу возникновения в них вихревых токов. При постоянном токе они не обладают электромагнитными экранирующими свойствами. С ростом частоты экранирующий эффект немагнитных экранов возрастает. Это обстоятельство является весьма важным при разработке и конструировании цифровых кабелей связи.

График частотной зависимости магнитного и немагнитного экранов (рис. 9.2) включает три характерные частотные зоны. В первой зоне от 0 до 3...10 кГц магнитный экран работает в магнитоэлектрическом режиме и обладает лучшими экранирующими свойствами, чем немагнитный экран. Во второй и третьей зонах оба экрана находятся в электромагнитном режиме. Но во второй зоне от f_1 до $f_2 \approx 10^6$ Гц немагнитный экран имеет больший экранирующий эффект, чем магнитный, а в третьей зоне от $f_2 = 10^6$ Гц и выше явно видно превосходство стального экрана. Это обусловлено тем, что магнитные экраны хорошо поглощают энергию и очень плохо отражают ее,

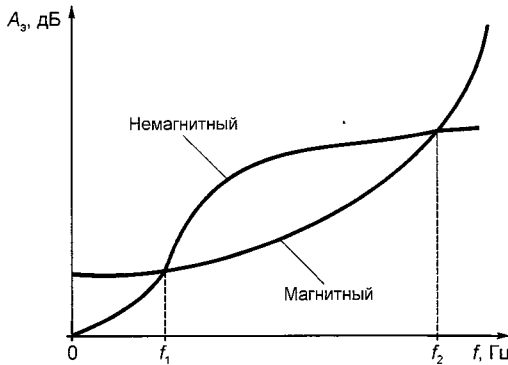


Рис. 9.2. Эффективность экранирования немагнитных и магнитных экранов

$A_{\text{п}} > A_0$. У немагнитных материалов, наоборот, $A_{\text{п}} < A_0$. Частота 0,8–1,0 МГц является частотой раздела, ниже которой преобладает затухание отражения над затуханием поглощения $A_{\text{п}} < A_0$, а выше, наоборот, $A_{\text{п}} > A_0$. Поэтому в нижней области частот, где экранирующий эффект определяется затуханием отражения, медный или алюминиевый экран заметно эффективней стального. В области вы-

соких частот (0,8...1,0 МГц и выше), где начинает преобладать затухание поглощения, лучше применять стальной экран.

Несколько слов о конструктивных разновидностях экранов.

В технике связи имеют широкое применение три основных конструктивных разновидности экранов: плоские, цилиндрические и сферические. По эффекту экранирования их можно расположить в следующей последовательности: плоский экран, цилиндр, шар.

Для немагнитных экранов преимущество цилиндра по сравнению с шаром и, в свою очередь, плоского экрана по сравнению с обеими этими конструкциями обусловлено тем, что плоская волна имеет лучшее соотношение волновых сопротивлений диэлектрика и металла $N = Z_{\text{д}}/Z_{\text{м}}$, и поэтому происходит большее отражение волны на границах диэлектрик–экран–диэлектрик и соответственно обеспечивается больший эффект экранирования отражения (S_0).

Вместе с тем конструктивная форма экрана сравнительно мало влияет на его экранирующие характеристики. Решающее значение имеет материал, из которого изготовлен экран ($k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$), толщина экрана t и радиус экрана r_3 . Малое влияние формы экрана — весьма ценное обстоятельство, так как позволяет в практике расчета и конструирования экранов, а также при определении эффективности существующих экранов применять обобщенные формулы экранирования.

Для магнитных экранов действует обратная закономерность, т.е. по экранирующему эффекту на первом месте находится сфера, затем цилиндр и, наконец, плоский экран. Это положение имеет следующее физическое объяснение. Магнитостатический экран действует по принципу замыкания

магнитного потока в магнитной массе экрана. Чем меньше сопротивление экрана данному потоку, тем больше экранирующий эффект. Конструкция экрана в виде шара или цилиндра более полно отвечает этому требованию по сравнению с плоским экраном.

9.4. Экранирование КШД от внешних помех

Вышеприведенная теория и выведенные формулы справедливы только для экранирования симметричных цепей, находящихся в общей скрутке кабеля, когда отсутствует влияние земли, и расстояние между токопроводящими жилами (a), как правило, меньше, чем расстояние от цепей до земли (h). Экранирующий эффект обусловлен лишь затуханием поглощения A_n и затуханием отражения A_o . Эти явления связаны с вихревыми поперечными токами в экранирующей оболочке.

При наличии внешних источников помех, например, высоковольтных линий передачи, контактных цепей электрифицированного транспорта, мощных радиостанций и других устройств, создающих внешнее мешающее поле, следует учитывать экранирующее действие, обусловленное продольными токами, протекающими в экранирующей оболочке (экране) A_z (рис. 9.3).

Продольные токи, наводимые токами внешних помех, создают в экранирующей оболочке обратное поле реакции, ослабляющее поле помех. Экранирующий эффект, обусловленный продольными токами, достигает значительной величины в случае заземления экранирующей оболочки.

Экранирующий эффект металлических оболочек при влиянии внешних источников помех определится как $A_s = A_n + A_o + A_z$. Формулы для нахождения A_n и A_o приведены выше.

Рассмотрим экранирующее действие A_z , обусловленное продольными токами в металлической оболочке, протекающими по цепи земля–оболочка–земля.

Коэффициент экранирования металлической оболочки кабеля относительно внешних помех рассчитывается так [16]:

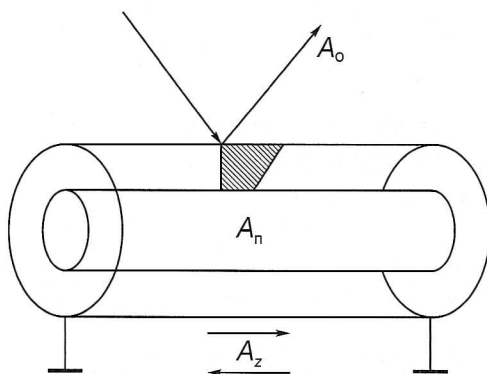


Рис. 9.3. К определению экранирующего эффекта относительно внешних помех

$$S_{\text{вн}} = Z_{12}/Z_{\text{об}}, \quad (9.7)$$

где Z_{12} — сопротивление связи экранирующей оболочки; $Z_{\text{об}}$ — полное сопротивление цепи оболочка–земля.

Величина $Z_{\text{об}}$ складывается из собственного сопротивления экранирующей оболочки Z_3 и сопротивления $Z_{\text{вн}}$, обусловленного магнитным полем, вызванным током, протекающим по оболочке:

$$Z_{\text{об}} = Z_3 + Z_{\text{вн}} = Z_3 + i\omega L_{\text{вн}}, \quad (9.8)$$

где $L_{\text{вн}}$ — внешняя индуктивность цепи оболочка–земля. Тогда

$$S_{\text{вн}} = \frac{Z_{12}}{Z_3 + i\omega L_{\text{вн}}}, \quad (9.9)$$

или

$$S = \frac{Z_{12}}{Z_3} \frac{Z_3}{Z_3 + i\omega L_{\text{вн}}}. \quad (9.10)$$

Затухание экранирования определится следующим образом:

$$A_{3,\text{вн}} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_{\text{вн}}} \right| = 8,7 \ln \left| \frac{Z_3}{Z_{12}} \right| + 8,7 \ln \left| 1 + \frac{i\omega L_{\text{вн}}}{Z_3} \right|. \quad (9.11)$$

Первое слагаемое выражения (9.11) соответствует затуханию поглощения $A_{\text{п}}$. Действительно:
сопротивление связи

$$Z_{12} = \frac{1}{2\pi\sqrt{r_1 r_2}} Z_{\text{м}} \frac{1}{\text{sh} kt}; \quad (9.12)$$

сопротивление оболочки

$$Z_3 = \frac{1}{2\pi r_2} Z_{\text{м}} \frac{1}{\text{th} kt}, \quad (9.13)$$

где $Z_{\text{м}} = \sqrt{i\omega\mu/\sigma}$ — волновое сопротивление металла; $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых токов; t — толщина экранирующей оболочки; r_1, r_2 — внутренний и внешний радиусы оболочки.

Тогда $8,7 \ln \left| \frac{Z_3}{Z_{12}} \right| = 8,7 \ln |\text{ch} kt| = A_{\text{п}}$. Затухание экранирования оболочки

в режиме защиты от внешних помех

$$A_{э,вн} = 8,7n |\operatorname{ch} kt| + 8,7 \ln \left| 1 + \frac{i\omega L_{вн}}{Z_3} \right| = 8,7 \ln |\operatorname{ch} kt| + 8,7 \ln \left| 1 + \frac{i\omega L_{вн} 2\pi r \operatorname{th} kt}{Z_M} \right|. \quad (9.14)$$

Последнее выражение включает все три составляющие экранирующего действия: $A_{э,вн} = A_n + A_o + A_z$.

Затухание этой же оболочки в режиме защиты от взаимных помех симметричных цепей можно найти из выражения

$$A_3 = 8,7 \ln |\operatorname{ch} kt| + 8,7 \ln \left| 1 + \frac{1}{2} \frac{Z_n}{Z_M} \operatorname{th} kt \right|,$$

где первый член — затухание поглощения A_n , а второй — затухание отражения A_o , т.е. $A_3 = A_n + A_o$.

Для вычисления A_z сопоставим эти две формулы для $A_{э,вн}$ и A_3 :

$$A_{э,вн} = A_3 + A_z, \quad (9.15)$$

где

$$A_z = 8,7 \ln \left| \frac{1 + i\omega L_{вн} \frac{2\pi k}{Z_M} \operatorname{th} kt}{1 + \frac{1}{2} \frac{Z_n}{Z_M} \operatorname{th} kt} \right|. \quad (9.16)$$

Преобразуем выражение (9.16) применительно к высокочастотной области, для которой (при $kt > 3$), начиная примерно от 10 кГц, имея в виду, что второй член выражения (9.16) больше единицы, получим

$$A_z = 8,7 \ln \left| \frac{i\omega L_{вн} \frac{2\pi k}{Z_M} \operatorname{th} kt}{\frac{1}{2} \frac{Z_n}{Z_M} \operatorname{th} kt} \right| = 8,7 \ln \left| \frac{i\omega L_{вн} 4\pi r}{Z_n} \right|. \quad (9.17)$$

Так как волновое сопротивление диэлектрика $Z_n = i\omega\mu_o r$, то

$$A_z = 8,7 \ln \left| 4\pi \frac{L_{вн}}{\mu_o} \right| = 8,7 \ln \left| 4\pi \frac{L_{вн}}{4\pi \cdot 10^{-7}} \right| = 8,7 \ln |L_{вн} \cdot 10^7| \text{ Н}, \quad (9.18)$$

где $L_{вн}$ — внешняя индуктивность цепи оболочка–земля имеет размерность генри/м (Г/м), определяемая по формуле

$$L_{вн} = \left[8,7 \ln \frac{1,72}{\omega\mu_3\sigma_3 hD} - i \frac{\pi}{2} \right] 10^{-7} \text{ Г/м}, \quad (9.19)$$

где h — глубина заложения кабеля, м; D — диаметр кабеля, мм; σ — удельная проводимость земли, См/м; μ_3 — магнитная проницаемость земли, равная примерно $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м. Имея в виду, что внешняя индуктивность оболочки для тональных частот примерно $2 \cdot 10^{-6}$ Г/м, получим затухание экранирования за счет продольных токов, дБ,

$$A_Z = 8,7 \ln |L_{\text{вн}} \cdot 10^7| = 8,7 \ln |2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7| = 26.$$

На рис. 9.4 приведены расчетные величины A_Z . Тут же для сравнения показаны значения A_3 и $A_{3, \text{вн}}$.

Расчеты выполнены для медного экрана диаметром 30 мм, толщиной 0,2 мм. Из рис. 9.4 видно, что экранирующая оболочка в режиме защиты от внешних помех ($A_{3, \text{вн}}$) имеет более высокие экранирующие свойства, чем в режиме защиты от взаимных помех симметричных цепей (A_3). Превышение обусловлено величиной затухания экранирования продольных токов A_Z и составляет 17,4...21,7 дБ во всем диапазоне частот. На высоких частотах величина A_Z определяется лишь внешней индуктивностью цепи оболочка–земля.

С увеличением частоты экранирующие характеристики $A_{3, \text{вн}}$ и A_3 растут, тогда как A_Z при высоких частотах имеет медленно спадающий характер. Расчеты показывают, что примерно до частот 15...20 кГц преобладает затухание экранирования за счет продольных токов (A_Z), а свыше сказывается эффект поперечных вихревых токов (A_3).

Таким образом, зная эффективность экрана от взаимных помех симметричных цепей ($A_3 = A_{11} + A_0$), можно путем прибавления величины A_Z определить характеристики такого экрана в режиме защиты от внешних помех ($A_{3, \text{вн}} = A_3 + A_Z$).

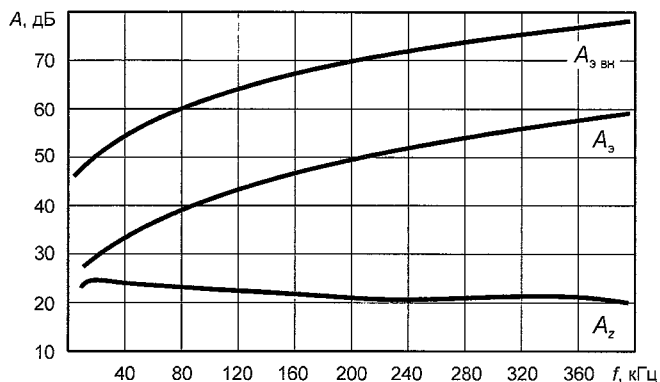


Рис. 9.4. Экранирующее действие оболочки в режимах защиты от внешних помех ($A_{3, \text{вн}}$) и защиты от взаимных помех (A_3)

9.5. Физические процессы в составных экранах

Цифровые кабели связи работают в сложных условиях влияния различных помех. Конструкторская мысль направлена на создания кабелей, влияние помех на которые было бы минимальным. В связи с этим интерес представляют разработки кабелей, в которых электромагнитные экраны представляют собой комбинированные многослойные конструкции. В них экраны состоят главным образом из последовательно чередующихся немагнитных (медь, алюминий) и магнитных (сталь) слоев. Преимущество таких многослойных экранов в высокой экранирующей эффективности и сравнительно малых потерях энергии. Это объясняется следующим образом. При рассмотрении однородных экранов электромагнитного действия было установлено, что экранирующий эффект определяется совместным действием экранирования поглощения S_{Π} и экранирования отражения S_o на границах диэлектрик–металл–диэлектрик. Эффект отражения обусловлен несоответствием волновых характеристик сопрягаемых сред (Z_d и Z_m) и чем больше это несоответствие, тем больше экранирующее действие. В многослойном экране, составленном из металлов с различными волновыми сопротивлениями Z_m , действует целая система таких многократных отражений от границ электрических несоответствий ($Z_{m1} \neq Z_{m21} \neq Z_{m3} \neq Z_{m4}$ и т.д.). Поэтому экран, состоящий из нескольких тонких слоев различных металлов, будет обладать большей эффективностью экранирования по сравнению с однородным экраном эквивалентной толщины.

Существенными признаются порядок расположения слоев, их электрическое сочетание, соотношение толщин слоев, а также место по отношению к влияющей цепи. Так, сочетание сталь–медь–алюминий дает заметно меньший эффект, чем медь–сталь–алюминий. Если внешние слои многослойного экрана выполнены из немагнитных материалов, то потери в нем сравнительно невелики.

Рассмотрим физические процессы в двухслойных экранах, как наиболее часто применяющихся в кабелях связи, в том числе и цифровых.

Экранное затухание двухслойного экрана может быть вычислено по формуле

$$A_{\text{э12}} = 8,7 \ln \left| \frac{1 - P_1 P_2}{S_1 S_2} \right| = A_{\text{н12}} + A_{\text{о12}}, \tag{9.20}$$

где P_1, P_2 и S_1, S_2 — коэффициенты реакции и экранирования первого и второго слоев экрана соответственно; k_1, k_2 и t_1, t_2 , — параметры первого и второго слоев экрана соответственно;



$$A_{\text{п12}} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_{\text{п1}} S_{\text{п2}}} \right| = 8,7 \ln |\text{ch } k_1 t_1 \cdot \text{ch } k_2 t_2|; \quad (9.21)$$

$$A_{\text{о12}} = 8,7 \ln \left| \frac{1 - P_1 P_2}{S_{\text{о1}} S_{\text{о2}}} \right| = 8,7 \ln \left| 1 + \frac{1}{2} \left(N_1 + \frac{1}{N_1} \right) \text{th } k_1 t_1 + \frac{1}{2} \left(N_2 + \frac{1}{N_2} \right) \text{th } k_2 t_2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(N_3 + \frac{1}{N_3} \right) \text{th } k_1 t_1 \cdot \text{th } k_2 t_2 \right|. \quad (9.22)$$

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что по своей структуре формулы расчета экранирующих свойств составного экрана аналогичны формулам расчета экранирования однослойных экранов. Экранное затухание ($A_{\text{э12}}$) состоит из экранного затухания поглощения в металле ($A_{\text{п12}}$) и экранного затухания отражения ($A_{\text{о12}}$). Экранное затухание поглощения включает произведение гиперболических косинусов соответствующих параметров (kt) первого и второго слоев экрана и равно сумме затуханий поглощения обоих слоев экрана. Экранное затухание отражения содержит несколько составляющих, которые обусловлены отражением на соответствующих границах сред:

$$\frac{1}{2} \left(N_1 + \frac{1}{N_1} \right) \text{th } k_1 t_1 \text{ — диэлектрик—первый слой экрана;}$$

$$\frac{1}{2} \left(N_2 + \frac{1}{N_2} \right) \text{th } k_2 t_2 \text{ — второй слой экрана—диэлектрик;}$$

$$\frac{1}{2} \left(N_3 + \frac{1}{N_3} \right) \text{th } k_1 t_1 \cdot \text{th } k_2 t_2 \text{ — первый слой экрана—второй слой экрана.}$$

Абсолютные значения указанных выражений обусловлены соотношениями волновых сопротивлений сопрягаемых сред. Чем больше несоответствие, тем больше значения N и выше экранирующий эффект. Так, роль и удельная значимость различных сопряжений в общем экранирующем эффекте характеризуются для конструкции медь—сталь толщиной слоев по 0,1 мм при частоте 100 кГц относительно магнитного поля следующим образом:

$$Z_{\text{д}}^{\text{н}} = 13,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом, } Z_{\text{меди}} = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ Ом, } Z_{\text{стали}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

$$\text{Соответственно } N_1 = 115, \frac{1}{N_1} = 0,0087;$$

$$N_2 = 4,2, \frac{1}{N_2} = 0,24;$$

$$N_3 = 0,036, \frac{1}{N_3} = 27,5.$$

Тогда затухание отражения на соответствующих границах будет: воздух–медь — 32,1 дБ, воздух–сталь — 9,6 дБ, медь–сталь — 19,1 дБ. Все сопряжение вместе (воздух–медь–сталь–воздух) дает 33,9 дБ. Следовательно, наибольший экранирующий эффект создает граница диэлектрик–медь. Эффект граничного несоответствия диэлектрик–сталь весьма мал. Отражение на границе разных металлов обеспечивает несколько бóльший эффект, чем на границе диэлектрик–сталь. Кроме того, при одном слое ($t_2 = 0$) анализируемая формула экранирования составных экранов принимает вид, свойственный однослойным экранам:

$$A_{\text{в12}} = A_{\text{в}} = 8,7 \ln \left| \operatorname{ch} kt \left[1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th} kt \right] \right|.$$

Если оба слоя имеют одинаковую толщину и выполнены из однородного металла ($k_1 t_1 = k_2 t_2 = kt$), то

$$\begin{aligned} A_{\text{в12}} &= 8,7 \ln \left| \operatorname{ch}^2 kt \left[1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th} kt + \operatorname{th}^2 kt \right] \right| = \\ &= 8,7 \ln \left| \operatorname{ch} 2kt \left[1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th} 2kt \right] \right|, \end{aligned} \quad (9.23)$$

т.е. двухслойный экран, выполненный из однородных металлов ($t_1 + t_2$), дает тот же эффект, что и однослойный экран удвоенной толщины $2t$.

Экранное затухание двухслойного экрана $A_{\text{в12}}$ выражается через затухание поглощения $A_{\text{п12}}$ и затухание отражения $A_{\text{о12}}$ этого экрана. Экранирующие характеристики двухслойного экрана $A_{\text{в12}}$ также можно выразить через экранирующие характеристики однослойных экранов, входящих в этот составной экран ($A_{\text{в1}}$ и $A_{\text{в2}}$). Действительно, так как

$$S_{12} = \frac{S_1 S_2}{1 - P_1 P_2}, \text{ то } A_{\text{в12}} = 8,7 \ln \left| \frac{1 - P_1 P_2}{S_1 S_2} \right| = A_{\text{в1}} + A_{\text{в2}} + A_{\text{вп}},$$

где $A_{\text{в1}} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_1} \right| = 8,7 \ln \left| \operatorname{ch} k_1 t_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(N_1 + \frac{1}{N_1} \right) \operatorname{th} k_1 t_1 \right] \right|;$

$$A_{3,2} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_2} \right| = 8,7 \ln \left| \operatorname{ch} k_2 t_2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(N_2 + \frac{1}{N_2} \right) \operatorname{th} k_2 t_2 \right] \right|. \quad (9.24)$$

Параметр A_p — это затухание взаимодействия (реакции) между слоями экрана. Он характеризует эффективность сочетания различных металлов в составном экране:

$$A_p = 8,7 \ln |1 - P_1 P_2| = 8,7 \ln \left| \frac{1 + \frac{1}{2} \left(N_1 + \frac{1}{N_1} \right) \operatorname{th} k_1 t_1 + \frac{1}{2} \left(N_2 + \frac{1}{N_2} \right) \operatorname{th} k_2 t_2 + \frac{1}{2} \left(N_3 + \frac{1}{N_3} \right) \operatorname{th} k_1 t_1 \cdot \operatorname{th} k_2 t_2}{\left[1 + \frac{1}{2} \left(N_1 + \frac{1}{N_1} \right) \operatorname{th} k_1 t_1 \right] \left[1 + \frac{1}{2} \left(N_2 + \frac{1}{N_2} \right) \operatorname{th} k_2 t_2 \right]} \right|. \quad (9.25)$$

9.6. Диэлектрические прокладки в многослойных экранах

При разработке и конструировании КШД связи практический интерес представляет вопрос об эффективности и целесообразности применения диэлектрических прокладок (полиэтиленовых пленок) или обеспечения воздушных зазоров между металлическими слоями комбинированного экрана. Рассмотрим простейший случай двухслойного металлического экрана с диэлектрической прослойкой между металлическими слоями. Для исследования запишем формулу для трехслойного экрана [3]:

$$S = \frac{S_1 S_2 S_3}{(1 - P_1 P_2)(1 - P_2 P_3) - n P_1 P_3 S_2^2}. \quad (9.26)$$

Коэффициент n учитывает эффект толщины стенок экрана. Для цилиндрического экрана $n = (R_1/R_3)^2$, где R_1 — наружный диаметр первого слоя; R_3 — внутренний диаметр третьего слоя.

Для тонкостенных экранов принималось $n \approx 1$. Чтобы определить коэффициент экранирования двухслойного экрана с прослойкой, необходимо в формулу для S подставить экранирующие параметры диэлектрической прослойки (S_2 и P_2). Для диэлектрика $S_2 = 1$ и $P_2 = 0$. Тогда

$$S = \frac{S_1 S_2}{1 - n P_1 P_2}. \quad (9.27)$$

Экранное затухание такого экрана

$$A_э = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S} \right| = A_{э1} + A_{э3} + A_p,$$

где $A_{э1} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_1} \right|$ — экранное затухание первого металлического слоя;

$A_{э3} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_3} \right|$ — то же, второго металлического слоя; $A_p = 8,7 \ln |1 - nP_1P_3|$ —

затухание взаимодействия (реакции) слоев комбинированного экрана.

Сравнивая полученный результат с формулами расчета обычных двухслойных экранов, видим, что отличие заключается лишь в параметре A_p . В двухслойном экране $A_p = 8,7 \ln |1 - P_1P_3|$.

Для оценки целесообразности применения диэлектрической прокладки между металлическими слоями экрана рассчитаем затухание экрана цилиндрической конструкции с различной толщиной прокладки. Экран сталемедный, частота — 100 кГц, радиус экрана — 10 мм.

В табл. 9.1 приведены данные расчета экранного затухания двухслойного цилиндрического экрана при различных толщинах диэлектрических прокладок между слоями.

Таблица 9.1. Экранное затухание двухслойного экрана (медь–сталь) при различной толщине диэлектрической прокладки между слоями, дБ

Толщина диэлектрической прокладки, мм	Затухание медного слоя	Затухание стального слоя	Затухание взаимодействия	Экранное затухание
0	29,5	19,1	-8,16	40,5
1	29,5	19,1	-6,1	42,6
4	29,5	19,1	-3,0	45,6
10	29,5	19,1	-1,7	47,0

Применение тонких прокладок, близких по толщине к металлическим слоям (1 мм), не дает существенного эффекта (разница 2,1 дБ). Прокладка толщиной 10 мм приводит к увеличению экранного затухания на 6,5 дБ. Однако применение такой толстой прокладки между металлическими слоями явно не целесообразно, так как связано с увеличением габаритов экрана и расхода материалов на его изготовление.

9.7. Оптимальные конструкции многослойных комбинированных экранов

Для расчета конструкции КШД существенный интерес представляет определение наиболее выгодных соотношений толщин комбинированных экранов и установление исходных положений по разработке оптимальных экранов комбинированной конструкции. Имея в виду, что наибольшую эффективность в многослойных комбинированных экранах дает сочетание немагнитных (медь, алюминий) и магнитных (сталь) материалов, рассмотрим в первую очередь такие экраны.

Выше было показано, что экранное затухание двухслойного экрана определяется формулой

$$A_{\text{э12}} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_{12}} \right| = 8,7 \ln \left| \frac{S_1 S_2}{1 - P_1 P_2} \right| = A_{\text{э1}} + A_{\text{э2}} + A_p,$$

или $A_{\text{э12}} = 8,7 \ln \left| \frac{1}{S_{12}} \right| = A_{\text{н12}} + A_{\text{о12}}.$

Для получения более простых и наглядных результатов рассмотрим условия конструирования оптимальных экранов отдельно для низко- и высокочастотной зон передачи.

Для низкочастотного диапазона характерно использование магнитных материалов (стали) в магнитостатическом режиме. Экранное затухание плоского стального экрана определяется формулой $A_s^c = \ln |1 + \mu t / (4r_s)|$. Коэффициент реакции имеет значение, близкое $k - 1$, т.е. $P^c = -1$. Экранное затухание медного экрана в области низких частот имеет вид $A_s^m = 8,7 \ln |1 + k^2 r_s t|$. Коэффициент реакции для этого случая близок к нулю, т.е. $P^m = 0$.

Затухание взаимодействия такого двухслойного экрана (медь–сталь) равно нулю: $A_p = 8,7 \ln(1 - P_1 P_2) = 0$.

Экранное затухание двухслойного экрана

$$A_{\text{э12}} = 8,7 \ln \left| \left(1 + k_1^2 r_s t_1\right) \left(1 + \frac{\mu_2 t_2}{4r_s}\right) \right|.$$

Пренебрегая единицами по сравнению со вторыми членами, стоящими в скобках, получим $A_{\text{э12}} = 8,7 \ln \left| \frac{k_1^2 \mu_2 t_1 t_2}{4} \right|$, где индексы 1 и 2 относятся соответственно к медному и стальному слоям. Аналогичное выражение получается для цилиндрического экрана, который нас интересует в большей степени.

Для нахождения наиболее выгодного соотношения толщин слоев экрана, при котором достигается наибольшее значение экранного затухания, выражение $A_{э12}$ исследуется на максимум [2]. Наиболее выгодный результат получается при равенстве толщин слоев меди и стали двухслойного сталемедного экрана. Максимальный экранирующий эффект имеет вид

$$A_{э12} = 8,7 \ln \left| \frac{k_1^2 \mu_2 t_1^2}{4} \right|. \tag{9.28}$$

Из формулы видно, что экранное затухание определяется значением вихревых токов в меди ($k_1 = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$), величиной магнитной проницаемости стали (μ_2) и зависит от толщины слоев экрана ($t_1 = t_c = t_m$). Полученные выводы справедливы для плоских, цилиндрических и сферических экранов в диапазоне частот до 10 кГц. Исследования и формула (9.28) могут быть распространены на любое сочетание магнитных и немагнитных материалов.

Для высокочастотной области наиболее выгодный эффект достигается при больших толщинах магнитных металлов (сталь) и меньших — немагнитных металлов (медь, алюминий).

Изменение оптимальной толщины медного слоя в процентах от общей толщины экрана ($t = 0,4$ мм) показано на рис. 9.5, где явно видны три частотные области.

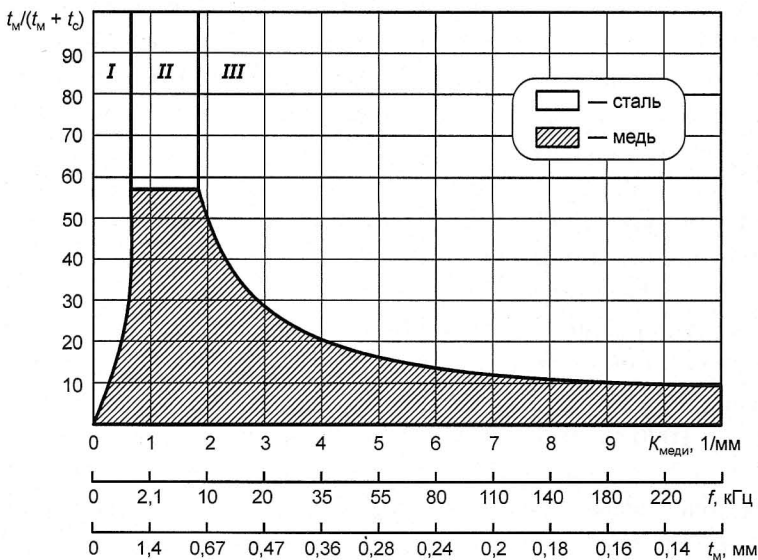


Рис. 9.5. Оптимальное соотношение толщин слоев комбинированного экрана (медь–сталь)

Область I — постоянный ток и весьма низкие частоты (до 0,5 кГц). Здесь наилучшие результаты обеспечивает однородный стальной экран. Это обусловлено тем, что в указанном частотном диапазоне электромагнитное экранирование практически отсутствует, поэтому экранирующий эффект меди ничтожен, а сталь в магнитоэстатическом режиме дает весьма хорошие результаты.

Область II — примерно от 0,5 до 10 кГц. Здесь могут быть рекомендованы равные толщины медного (алюминиевого) и стального слоев. Эффективное действие меди (алюминия) начинается в электромагнитном режиме, а сталь продолжает работать преимущественно в магнитоэстатическом режиме

Область III — от 10–20 кГц до высоких частот. Как медь (алюминий), так и сталь действуют в электромагнитном режиме на принципе вихревых токов. Из рис. 9.5 видно, что с возрастанием частоты оптимальная толщина медного слоя уменьшается, а стального увеличивается. Так, если на частоте 7 кГц оптимальная толщина медного слоя составляла 50% общей толщины экрана, то при $f = 110$ кГц она не превышает 15%.

В области более высоких частот (примерно выше 1000 кГц) составной комбинированный экран вообще теряет смысл, и с точки зрения экранирующего эффекта в преимущественном положении находится чисто стальной экран. Этот результат имеет вполне логичное физическое объяснение и полностью соответствует основным положениям волновой теории экранов.

Выше было показано, что экранирующий эффект обусловлен суммарным действием затухания отражения (A_o) и затухания поглощения (A_n). Там же обосновано, что медь (алюминий) обладает высокими отражательными свойствами, а сталь — большим затуханием поглощения в металле. Поэтому в области сравнительно низких частот (10–20 кГц), где доминирует фактор затухания отражения, нет нужды в толстых стальных экранах. С ростом частоты возрастает удельная роль затухания поглощения, экранирующий эффект стали становится больше, чем меди, и поэтому целесообразно увеличивать толщину стального слоя. В этом случае реализуется положительный эффект затухания поглощения стального слоя и сохраняется должное значение затухания отражения на границе диэлектрик–медь (A_o), которое сравнительно мало зависит от толщины слоя. Наконец, в области еще более высоких частот (около 1000 кГц), когда затухание поглощения в стали (A_n) начинает преобладать над затуханием отражения на границе диэлектрик–медь (A_o), становится более эффективным применение чисто стального экрана.

На рис. 9.6 приведены результаты расчета экранного затухания сталемедного экрана общей толщиной 0,4 мм при различных соотношениях толщин стали и меди. Расчет выполнен при радиусе экрана 17,5 мм и частоте 55 кГц.

С увеличением толщины стали растёт параметр A_n и уменьшается A_o . Наивыгоднейший эффект даёт комбинированный экран с толстым стальным ($t_c = 82\%$) и тонким медным ($t_m = 18\%$) слоями. Такой экран даёт затухание на 11,3 дБ больше, чем однородный стальной экран и на 21 дБ больше, чем однородный медный экран эквивалентной толщины.

Вышеприведенные соображения по выбору оптимальных соотношений толщин слоев составных экранов и конструированию двухслойных комбинированных экранов остаются в силе для других конструкций экранов.

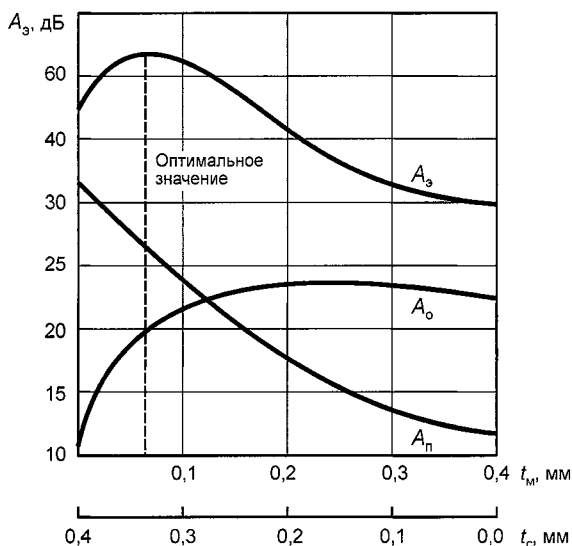


Рис. 9.6. Экранное затухание двухслойного экрана при различных толщинах меди и стали

9.8. Параметры передачи симметричных экранированных цепей

Рассмотрим основные положения теории распространения электромагнитных колебаний в среде передачи цифровых кабелей связи и определим методику расчета их конструктивных и электрических характеристик.

Как известно [1], наиболее важными характеристиками, определяющими величину тока и напряжения в цепи, являются первичные и вторичные параметры передачи. К первичным параметрам цепей относятся: активное сопротивление R , индуктивность L , емкость C и проводимость G . Ко вторичным — волновое сопротивление цепи Z_v и коэффициент распространения $\gamma = \alpha + i\beta$, где α — коэффициент затухания цепи, дБ/км; β — коэффициент фазы, рад/км.

Вторичные параметры зависят от первичных и определяются выражениями

$$Z_v = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}; \tag{9.29}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}. \tag{9.30}$$

Первичные параметры передачи

Первичные параметры симметричных цепей (R, L, C, G) с экранами и без экранов приведены в [6, 7].

Рассмотрим формулы расчета симметричных экранированных цепей применительно к интересующему нас частотному диапазону.

Активное сопротивление симметричной экранированной цепи, Ом/км, может быть определено по формуле

$$R = 2R_0 \left[1 + F(|k|r_0) \frac{G(|k|r_0)(r_0/a)^2}{1 - H(|k|r_0)(r_0/a)^2} \left(1 - 4 \frac{a^2 r_0^2}{r_s^4 - a^4} \right) \right] + R_s, \quad (5.31)$$

где $2R_0$ — сопротивление цепи постоянному току; $2R_0 F(|k|r_0)$ — сопротивление, возникающее за счет поверхностного эффекта, Ом/км;

$$2R_0 \frac{G(|k|r_0)(r_0/a)^2}{1 - H(|k|r_0)(r_0/a)^2} \left(1 - 4 \frac{a^2 r_0^2}{r_s^4 - a^4} \right) = R_{\text{бл}} - R_{\text{пз}} \quad (9.32)$$

сопротивление близости ($R_{\text{бл}}$) с учетом реакции экрана ($R_{\text{пз}}$); $F(|k|r_0)$; $G(|k|r_0)$; $H(|k|r_0)$ — табулированные функции Бесселя, значения которых приведены в табл. 9.2; $|k| = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых токов; r_0 — радиус токопроводящей жилы; a — половина расстояния между проводами цепи; R_s — сопротивление потерь в экране.

Физическая сущность появления сопротивления потерь в цепи из-за наличия экрана заключается в следующем. Переменное электромагнитное поле, создаваемое током, протекающем по экранированной цепи, наводит в толще экрана вихревые токи. Последние токи вызывают нагревание металлической толщи экрана и создают дополнительные тепловые потери энергии. В свою очередь, это приводит к «отсасыванию» определенной доли энергии, передаваемой по кабельной цепи, которое и учитывается в виде дополнительного сопротивления цепи R_s .

При рассмотрении электрических потерь в экранах различают три характерные зоны, которые классифицируются по величине коэффициента вихревых токов ($k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$) и толщины экрана (t).

На рис. 9.7 показана типовая зависимость сопротивления потерь R_s от величины kt .

Таблица 9.2. Значения коэффициентов $F(|k|r_0)$, $G(|k|r_0)$, $H(|k|r_0)$, $Q(|k|r_0)$

$ k r_0$	$F(k r_0)$	$G(k r_0)$	$H(k r_0)$	$Q(k r_0)$
0	0	$\frac{(k r_0)^4}{64}$	0,0417	1
0,5	0,000326	0,000975	0,042	0,9998
1,0	0,00519	0,01519	0,053	0,997
1,5	0,0258	0,0691	0,092	0,987
2,0	0,0782	0,1724	0,169	0,961
2,5	0,1756	0,295	0,263	0,913
3,0	0,318	0,405	0,348	0,845
3,5	0,492	0,499	0,416	0,766
4,0	0,678	0,584	0,466	0,686
4,5	0,862	0,669	0,503	0,616
5,0	1,042	0,755	0,530	0,556
7,0	1,743	1,109	0,596	0,400
10,0	2,799	1,641	0,643	0,282
10,0	$\frac{\sqrt{2} k r_0 - 3}{4}$	$\frac{\sqrt{2} k r_0 - 1}{8}$	0,750	$\frac{2\sqrt{2}}{ k r_0}$

Зона I охватывает только низкочастотные экранированные цепи и тонкие экраны. Сюда относятся преимущественно кабели тонального диапазона с тонкими экранами из меди и алюминия. Сопротивление потерь в экранах, попадающих в эту зону, рассчитывается по формуле

$$R_3 = 8R_0 \left(\frac{a}{r_3} \right)^2 \frac{|k|^2 r_3^2 t^2}{|k|^4 r_3^2 + 4} 10^6. \tag{9.33}$$

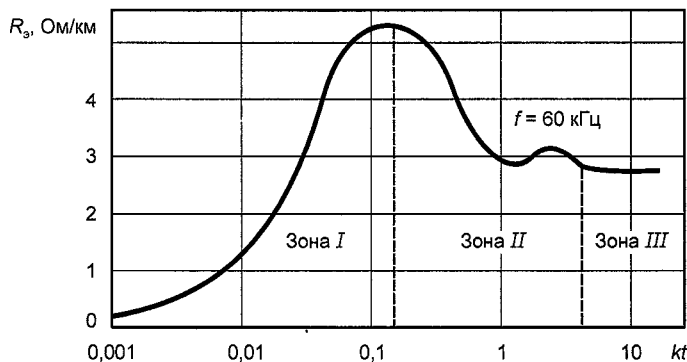


Рис. 9.7. Частотные зоны сопротивления потерь в экранах

Как видно из (9.33) и рис. 9.7, в этой зоне увеличение kt приводит к увеличению потерь в экране.

Зона II — зона высокочастотных КШД, представляет наибольший интерес. В нее попадают кабельные экраны из немагнитных материалов, предназначенные для диапазона частот до 10^6 Гц.

Сопrotивление потерь в данной зоне определяется формулой

$$R_3 = 8Z_{\text{ма}} \frac{1}{2\pi r_3} \frac{a^2 r_3^2}{r_3^4 - a^4} \frac{\text{sh}\sqrt{2}|k|t + \sin\sqrt{2}|k|t}{\text{ch}\sqrt{2}|k|t - \cos\sqrt{2}|k|t} \cdot 10^6, \quad (9.34)$$

где $Z_{\text{ма}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$ — активная составляющая волнового сопротивления экрана;

t — толщина экрана.

В зоне II, в отличие от предыдущей, потери в экране с ростом параметра kt не увеличиваются, а уменьшаются. Процесс снижения потерь происходит волнообразно по закону изменения гиперболического тангенса от комплексного аргумента.

Зона III — зона очень высоких частот и экранов, имеющих большую толщину. Расчет сопротивления потерь здесь следует вести в следующем виде:

$$R_3 = 8Z_{\text{ма}} \frac{1}{2\pi r_3} \frac{a_2 r_3^2}{r_3^4 - a^4} \cdot 10^6. \quad (9.35)$$

При эксцентрисичном расположении цепей в экране сопротивление потерь, вносимое экраном, возрастает. Сопротивление потерь при эксцентриситете может быть определено в следующем виде:

$$R_{3e} = R_3 \mathcal{E}, \quad (9.36)$$

где R_3 — сопротивление потерь при расположении цепи в центре;

$$\mathcal{E} = \frac{R_{3e}}{R_3} = \frac{r_3^2 + e^2}{r_3^2 - e^2} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{e}{r_3}\right)^2\right]^2} \text{ — коэффициент эксцентриситета;}$$

где r_3 — радиус экрана; e — эксцентриситет.

На рис. 9.8 представлена зависимость сопротивления потерь в экране R_{3e} от величины e/r_3 . Из графика видно, что малое смещение цепи относительно центра экрана почти не влияет на сопротивление потерь, но уже при $e = r_3/3$ начинается резкое увеличение R_{3e} . Это объясняется тем, что чем ближе к экрану расположена токопроводящая цепь, тем большее число магнитных силовых линий проникает в экран и тем большие потери создаются в нем.

Эффект близости в экранированных цепях за счет реакции экрана меньше, чем в неэкранированных, причем можно подобрать такое соотношение основных размеров поперечного сечения симметричной экранированной цепи, при котором потери на эффект близости будут устранены. Это возможно при

$$4 \frac{a^2 r^2}{r_3^4 - a^4} = 1. \quad (9.37)$$

Оптимальная конструкция кабеля с точки зрения активных потерь в цепи передачи будет при $a/r_3 = 0,486$. Округленно радиус экрана должен быть равен расстоянию между проводками ($2a = r_3$).

Индуктивность экранированной цепи так же, как и неэкранированной, состоит из наружной межпроводниковой индуктивности ($L_{н1}$), обусловленной внешним полем, и внутренней индуктивности ($L_{в1}$), обусловленной полем внутри проводков. Кроме того, в экранированной цепи появляется дополнительная индуктивность (L_3), вносимая экраном в цепь передачи. Влияние близости проводков на индуктивность не учитывается ввиду незначительности этого фактора. В принципе эффект близости приводит к снижению индуктивности цепи. Полная индуктивность симметричной экранированной цепи, Г/км, в данном случае:

$$L = L_{н1} + L_{в1} + L_3 = \left[4 \ln \frac{2a}{r_0} \frac{r_3^2 - a^2}{r_3^2 + a^2} + Q(|k|r_0) - 8 \frac{\mu_r \sqrt{2}}{|k|r_3} \frac{a^2 r_3^2}{r_3^4 - a^4} \right] \cdot 10^{-4}, \quad (9.38)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость экрана.

Значение $Q(|k|r_0)$ приведено в табл. 9.2.

Экран существенно изменяет индуктивность цепи. Воздействие экрана учитывается через параметр $\frac{r_3^2 - a^2}{r_3^2 + a^2}$. Для неэкранированных цепей $r_3 \rightarrow \infty$, и этот параметр равен единице.

Внешняя межпроводниковая индуктивность цепи за счет реакции экрана уменьшается. Это обусловлено тем, что экран в силу своей реакции воз-

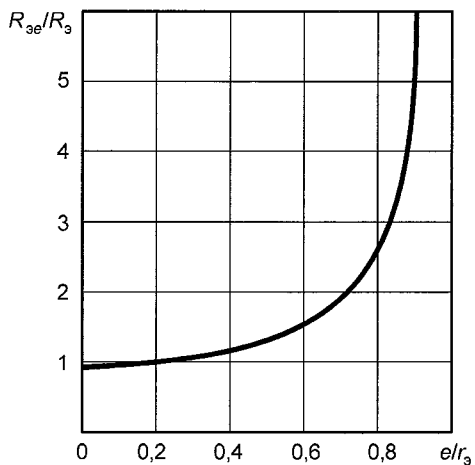


Рис. 9.8. Увеличение сопротивления потерь в экране при эксцентриситете в расположении цепей

буждает отраженное поле, которое по фазе противоположно направлению основного поля. В результате взаимодействия этих полей амплитуда результирующего поля, действующего внутри экрана, ослабляется и индуктивность цепи уменьшается.

На рис. 9.9 показан характер изменения внешней индуктивности цепи за счет реакции экрана при различных значениях a/r_3 . Из (9.35) и приведенных данных следует, что с уменьшением радиуса экрана межпроводниковая индук-

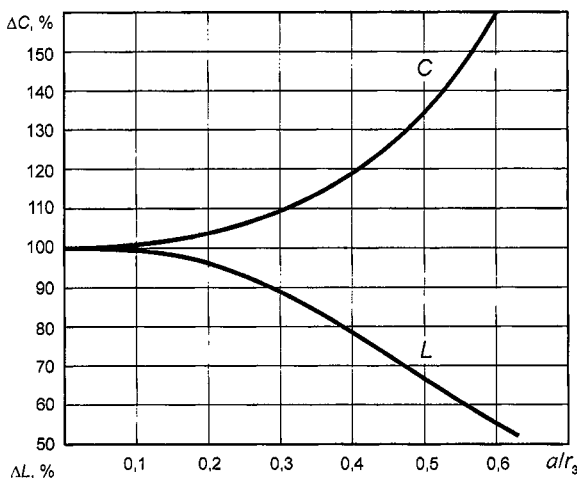


Рис. 9.9. Изменение емкости и индуктивности экранированной цепи при различных соотношениях a/r_3

тывность существенно уменьшается. В реальных кабельных конструкциях изменение индуктивности составляет 15–20%.

При алюмополимерном экране, который наиболее часто применяется в цифровых кабелях, экранная индуктивность (L_3) имеет сравнительно небольшое значение.

Электрическая емкость симметричной экранированной цепи является одним из главных параметров всех кабелей связи (в том числе КШД). Емкость определяет конструкцию кабеля и его вторичные пара-

метры передачи (коэффициенты затухания и фазы, волновое сопротивление). Методом нахождения электрической емкости посвящена обширная литература.

Основной метод расчета рабочей емкости, известный из электростатики, базируется на уравнениях Максвелла в потенциальных коэффициентах, связывающих между собой заряды и потенциалы всех отдельных жил кабеля. Этот метод решения для инженерных расчетов исключительно трудоемок и приводит к весьма громоздким выражениям.

Не случайно во многих странах в различные годы делались попытки вывода инженерных формул для расчета рабочей емкости. Не вдаваясь в историю вопроса, для практических целей нашего исследования остановимся на формуле, выведенной в 1938 г. В.Н. Кулешовым [7]:

$$C = \frac{\varepsilon_3 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2a}{d} \psi} \frac{\text{мкФ}}{\text{км}}, \quad (9.39)$$

где ϵ_3 — эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции токопроводящих жил;

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_d S_d + \epsilon_3 S_3}{S_d + S_3}, \tag{9.40}$$

ϵ_d и ϵ_3 — диэлектрические проницаемости диэлектрика изоляции жил и заполнителя сердечника кабеля; S_d и S_3 — площади поперечного сечения диэлектрика и заполнителя.

При определении ϵ_3 для пористого (вспененного) диэлектрика, в котором равномерно распределены отдельные пузырьки газа одинаковой величины, можно пользоваться формулой

$$\epsilon_{пд} = \epsilon_d - 1,3 f_{п}, \tag{9.41}$$

где $f_{п}$ — степень пористости диэлектрика, или отношение объемов пузырьков газа и исходного диэлектрика в пористом материале. Поправочный коэффициент, характеризующий удаление рассматриваемой цепи от заземленного экрана:

$$\psi = \frac{r_3^2 - a^2}{r_3^2 + a^2}. \tag{9.42}$$

На рис. 9.10 приведена зависимость $\epsilon_{пз}(f)$ для пористого полиэтилена, рассчитанная по (9.41).

Примерные значения коэффициента ψ для различного типа скрутки (парной или «звездной»):

- парная скрутка: $\psi = 0,75$;
- «звездная» скрутка: $\psi = 0,65$.

Интересно проследить зависимость емкости от изменения диаметра токопроводящих жил d и расстояния между ними a . На рис. 9.11 показано изменение емкости кабеля с увеличением расстояния между проводниками. С увеличением расстояния между проводниками a емкость ка-

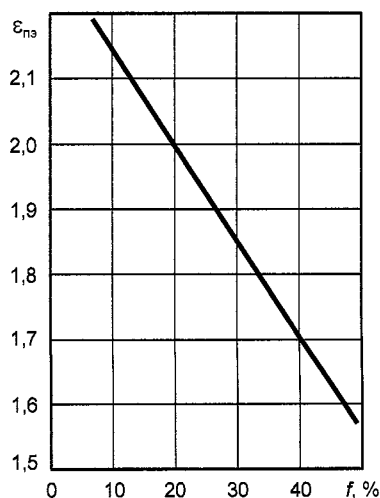


Рис. 9.10. Диэлектрическая проницаемость пористого полиэтилена согласно (5.41) при $f_{п} = 0$; $\epsilon_d = 2,3$

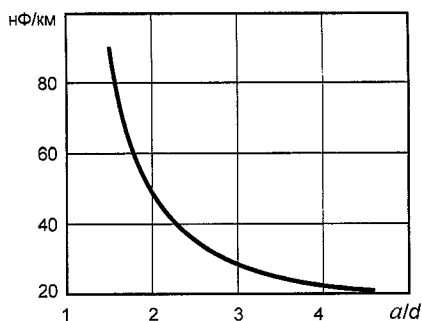


Рис. 9.11. Изменение емкости с увеличением расстояния между жилами

беля уменьшается. С увеличением диаметра токопроводящих жил d емкость кабеля растет.

Проводимость изоляции G экранированной цепи — это электрический параметр линии, характеризующий качество изоляции токопроводящих жил кабеля. Оценивает потери электромагнитной энергии в изоляции жил так же, как активное сопротивление характеризует потери электромагнитной энергии в металлических частях кабеля:

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (9.43)$$

где δ — угол (коэффициент) диэлектрических потерь.

Значения коэффициента диэлектрических потерь различных кабельных диэлектриков представлены в табл. 9.3.

Таблица 9.3. Частотная зависимость эффективных значений $\operatorname{tg} \delta (\times 10^{-4})$

Частота, кГц	Сплошная полиэтиленовая изоляция	Пленко-пористая полиэтиленовая изоляция
0,8	2	1–3
5	2	1–3
20	2	2–4
30	3	2–4
50	4	2–4
100	6	3–6
150	7	4–7
200	8	4–7
250	8	5–8

Основные зависимости первичных параметров симметричных цепей.

На рис. 9.12, 9.13 представлены сравнительные характеристики первичных параметров в зависимости от частоты, а также графики изменения R , L , C , G как функций расстояния между жилами кабеля и диаметра жил.

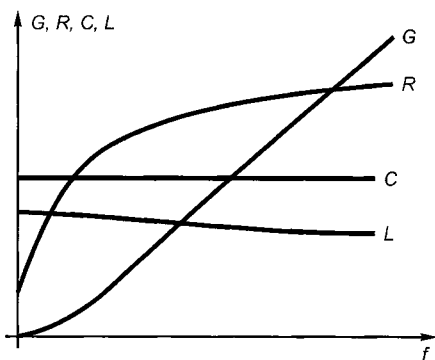


Рис. 9.12. Зависимость первичных параметров кабеля от частоты

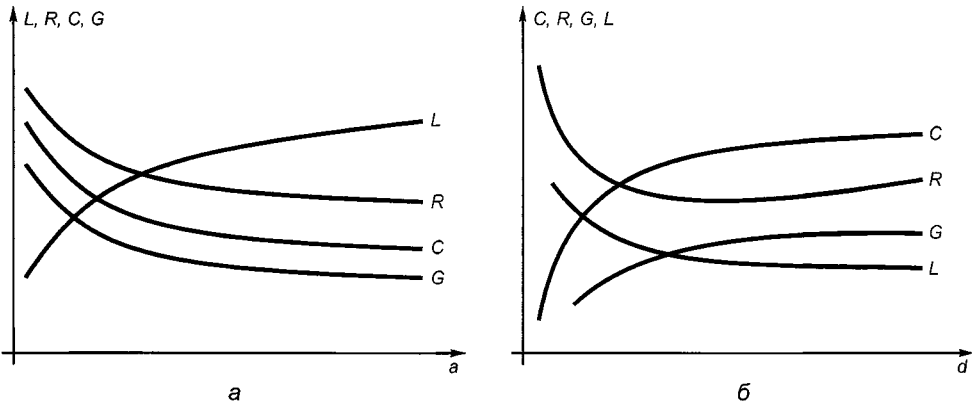


Рис. 9.13. Изменение первичных параметров кабеля с увеличением расстояния между его жилами (а) и диаметра его жил (б)

Вторичные параметры передачи

Электромагнитные волны, распространяясь вдоль цепи, уменьшаются по амплитуде и изменяются по фазе. Уменьшение энергии по длине цепи 1 км учитывается *коэффициентом затухания* α , а изменение фазы напряжения и тока на каждом километре цепи — *коэффициентом фазы* β .

Коэффициенты затухания (дБ/км) и фазы (рад/км) в общем виде в зависимости от первичных параметров передачи R, L, C , и G определяются по формуле *коэффициента распространения*

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)} = |\gamma|e^{i\varphi_\gamma}, \tag{9.44}$$

где $|\gamma| = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}$;

$$\varphi_\gamma = \frac{1}{2} \left(\arctg \frac{\omega L}{R} + \arctg \frac{\omega C}{G} \right).$$

Коэффициент затухания, дБ/км,

$$\alpha = 8,7|\gamma| \cos \varphi_\gamma. \tag{9.45}$$

Коэффициент фазы, рад/км,

$$\beta = |\gamma| \sin \varphi_\gamma. \tag{9.46}$$

Из (9.44) возможны и другие интерпретации формул для α и β :

$$\alpha = 8,7 \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]}; \quad (9.47)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]}. \quad (9.48)$$

Волновое сопротивление — это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной цепи без отражения. Определяется в зависимости от первичных параметров по формуле

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = |Z_{\text{в}}| e^{i\varphi_z}, \quad (9.49)$$

где $|Z_{\text{в}}| = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}}$;

$$\varphi_z = \frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R} - \operatorname{arctg} \frac{\omega C}{G} \right].$$

9.9. Некоторые выводы из теории экранирования скрученных цепей

Конструирование цифровых кабелей связи немислимо без четкого понимания вопросов обоснования технологических параметров производства, таких, как выбор шагов скрутки групп (пар, четверок), элементарных пучков и сердечников кабелей. В [2] подробно изложена теория экранирования скрученных цепей связи. Не подвергая сомнению ее выводы, хотелось бы напомнить читателям основные постулаты, некоторые выводы из исследований, проведенных выдающимися учеными И.И. Гродневым, К.Я. Сергейчуком, В.Н. Кулешовым и др., а также высказать ряд практических рекомендаций конструкторам кабельной продукции.

Рассмотренный в этой главе процесс экранирования касался нескрученных (аксиальных) цепей и не дает полного представления о реальной кабельной конструкции. Поэтому важное значение имеет исследование экранирующего эффекта скрученной кабельной цепи и установление характера влияния скрутки на величину экранного затухания и потерь в экране.

Рассмотрим экранирующие свойства цилиндрического экрана в случае экранирования скрученной симметричной цепи.

Для обычной нескрученной цепи имеется лишь аксиальное (продольное) электрическое поле E_z и связанные с ним поперечные компоненты напря-

женности магнитного поля H_ϕ и H_z . Это поле создается током I_z , протекающим по цепи в аксиальном направлении (рис. 9.14).

Соответственно поток мощности, распространяющийся в радиальном направлении от скрученной пары к экрану, может иметь две составляющие: во-первых, поток P^z , обусловленный аксиальной составляющей тока (I_z) и выражаемый через компоненты E_z и H_ϕ , во-вторых, поток P^ϕ , обусловленный тангенциальной составляющей тока (I_ϕ) и выражаемый через компоненты E_ϕ и H_z .

Поток P^z существует и в обычных (нескрученных) цепях. Поток P^ϕ является характерной особенностью скрученной цепи.

Опуская промежуточные расчеты, приведем выражение для результирующего волнового сопротивления, которое испытывает полный поток в радиальном направлении при любом произвольном числе n :

$$Z_{\pi}^h = Z_{\pi} \frac{h^2}{(2\pi r)^2 + h^2} \left[1 - \frac{2\pi r}{h} \frac{K_{n+1}\left(\frac{2\pi r}{h}n\right)}{K_n\left(\frac{2\pi r}{h}n\right)} \right], \tag{9.50}$$

где $Z_{\pi} = \frac{i\omega\mu r}{n}$ (кривая 1 на рис. 9.15); h — шаг скрутки; K_n, K_{n+1} — бесселевы функции второго рода.

На рис. 9.15 приведены графики изменения волновых сопротивлений с увеличением шага скрутки h для полного потока Z_{π}^h (кривая 3), а также отдельно аксиальной составляющей потока Z_{π}^z (кривая 2) и тангенциальной составляющей потока Z_{π}^{ϕ} (кривая 4).

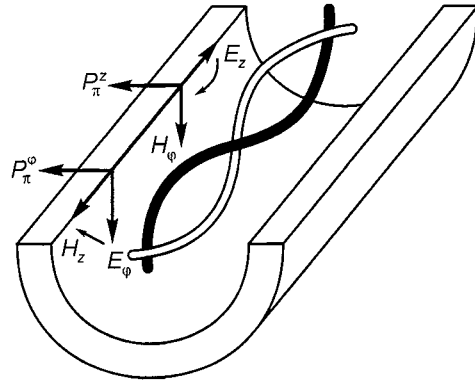


Рис. 9.14. Аксиальный и тангенциальный потоки энергии в скрученной экранированной цепи

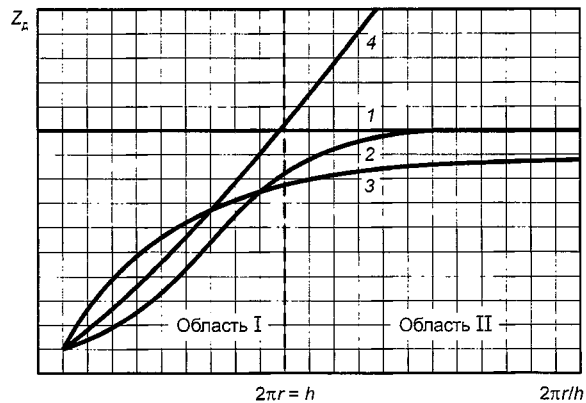


Рис. 9.15. Волновые сопротивления в скрученной цепи при различных шагах скрутки

Аксиальная составляющая потока EH , имея малые значения при малых шагах скрутки, увеличивается с возрастанием h и приближается к величине потока обычной (нескрученной) цепи. Соответственно растет величина аксиального волнового сопротивления Z_{λ}^z , т.е. при увеличении шага скрутки волновое сопротивление Z_{λ}^z устремляется к величине волнового сопротивления обычной нескрученной цепи.

На рис. 9.15 видны две характерные области значений волновых сопротивлений (9.50).

Область I — соответствует малым шагам скрутки ($h < 2\pi r$). В этой зоне доминирует тангенциальная составляющая поля (E_{φ}). Роль аксиальной составляющей (E_z) мала. По своей физической сущности поле этой области аналогично полю катушек индуктивности.

Область II — соответствует большим шагам скрутки ($h > 2\pi r$). Здесь превалирует аксиальная составляющая поля, а роль тангенциального поля невелика. К этой области относятся наиболее распространенные случаи кабельной скрутки.

Полный радиальный поток энергии с изменением шага скрутки h претерпевает довольно сложное изменение. В основном с ростом h величина потока увеличивается. При больших значениях h результирующее волновое сопротивление устремится к величине Z_{λ} :

$$Z_{\lambda}^h = \frac{i\omega\mu r}{n} \frac{h^2}{(2\pi r)^2 + h^2} \frac{2\pi r}{h} \frac{K_{n+1}\left(\frac{2\pi r}{h} - n\right)}{K_n\left(\frac{2\pi r}{h} - n\right)} \rightarrow \frac{i\omega\mu r}{n} = Z_{\lambda}. \quad (9.51)$$

Существенный интерес представляет рассмотрение потерь в скрученных экранированных цепях и выявление основных закономерностей влияния скрутки на потери в экранах.

Применительно к скрученным экранированным цепям изучению подлежат два потока энергии, распространяющихся в радиальном направлении от цепи к экрану:

1) поток комплексного вектора Пойнтинга, обусловленный аксиальной составляющей тока I_z :

$$P_{\parallel}^z = \operatorname{Re} \int_0^{2\pi} E_z H_{\varphi}^* d\varphi; \quad (9.52)$$

2) поток комплексного вектора Пойнтинга, обусловленный тангенциальной составляющей тока I_{φ} ,

$$P_n^\varphi = \operatorname{Re} \int_0^{2\pi} E_\varphi H_{\varphi z}^* r \, d\varphi. \quad (9.53)$$

В нескрученных цепях имелся лишь первый поток энергии, и им полностью определялись потери в экране.

Рассмотрение обеих потоков и вывод соответствующих аналитических зависимостей достаточно подробно изложено в [2]. Приведем здесь лишь конечные результаты исследований. В частности сопротивление потерь экранированной скрученной цепи можно вычислить по формуле

$$R_3^h = R_3^z + R_3^\varphi = 8Z_{\text{ма}} \frac{1}{2\pi k} \left[1 + \left(\frac{2\pi r_3}{h} \right)^2 \right] \times \sum \left[I_n \left(\frac{2\pi a}{h} n \right) K_n \left(\frac{2\pi r_3}{h} n \right) \right]^2 \left(\frac{4\pi a}{h} n \right)^2, \quad (9.54)$$

где R_3^z, R_3^φ — сопротивления потерь в экране, обусловленные аксиальной и тангенциальной составляющими суммарного потока энергии, протекающей по скрученной экранированной цепи; $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых потоков; $I_n \left(\frac{2\pi a}{h} n \right)$ — бесселева функция первого рода; $K_n \left(\frac{2\pi r_3}{h} n \right)$ — бесселева функция второго рода; n — произвольная постоянная; $Z_{\text{ма}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$ — активная составляющая волнового сопротивления металла экрана; r_3 — радиус экрана; h — шаг скрутки; $2a$ — расстояние между проводниками; t — толщина экрана.

На рис. 9.16 и 9.17 приведены результаты расчетов и измерения сопротивления потерь в стальном экране при различных шагах скрутки цепи.

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее.

1. Потери энергии в экране скрученной цепи есть функция как конструктивных параметров самой цепи (расстояние между проводниками $2a$, шаг скрутки h), так и конструктивных (радиус r_3 , толщина экрана t) и электрических (волновое сопротивление $Z_{\text{ма}}$) параметров экрана.

2. Потери энергии в скрученных экранированных цепях (9.54) меньше потерь в обычных (нескрученных) экранированных цепях (9.34). Чем больше шаг скрутки, тем больше потери, при $h \rightarrow \infty$ формула потерь в скручен-

ных цепях аналогична формуле потерь нескрученных цепей, и потери имеют максимальное значение. Это положение наглядно иллюстрируют рис. 9.16 и 9.17, где приведены результаты измерений сопротивления потерь. Это же подтверждает рис. 9.18, где представлены результаты теоретического расчета сопротивления потерь для различных шагов скрутки экранированной цепи.

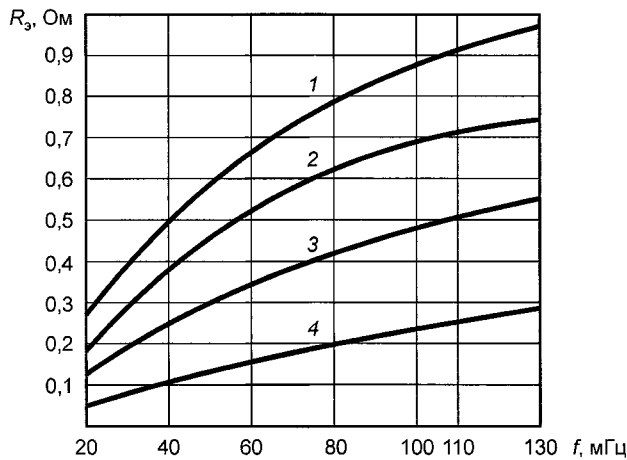


Рис. 9.16. Результаты расчета и измерения сопротивления потерь в стальном экране толщиной 0,2 мм при различных частотах:
1 — $h = \infty$, 2 — $h = 300$ мм, 3 — $h = 200$ мм, 4 — $h = 50$ мм

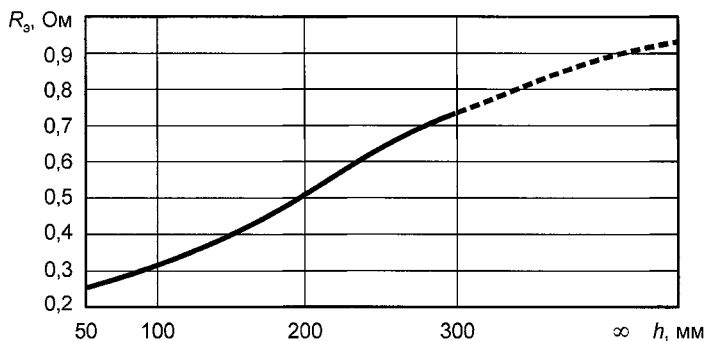


Рис. 9.17. Результаты измерения сопротивления потерь в стальном экране при различных шагах скрутки цепи ($f = 110$ кГц)

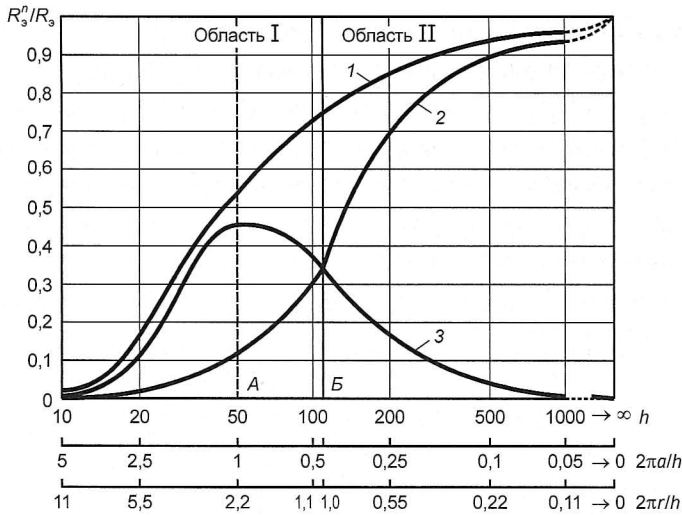


Рис. 9.18. Сопротивление потерь при различных шагах скрутки цепи:

$$1 - R_3^h = R_3^z + R_3^\varphi, 2 - R_3^z, 3 - R_3^\varphi$$

Снижение потерь в скрученных экранированных цепях объясняется удлинением путей вихревых токов в экране и соответственно увеличением сопротивления, которое они встречают на своем пути. Поэтому чем меньше шаг скрутки h , тем слабее вихревые токи в экране и меньше потери. В нескрученных цепях вихревые токи имеют наикратчайший путь — вдоль экрана, и поэтому потери энергии в экране максимальны. Из рис. 9.18 видно, что увеличение шага скрутки в 6 раз (с $h = 50$ мм до $h = 300$ мм) на частоте 110 кГц вызывает увеличение сопротивления потерь в 2,8 раза.

3. Потери в экране складываются из потерь, обусловленных действием аксиального поля, и потерь, вызываемых тангенциальным полем. Характер воздействия этих полей на потери в экране принципиально различен (см. рис. 9.18). Сопротивление потерь аксиального поля (R_3^z) с увеличением шага скрутки растет и при $h \rightarrow \infty$ устремляется к величине сопротивления потерь нескрученной цепи.

Потери, обусловленные тангенциальной составляющей поля R_3^φ , выражаются довольно сложной зависимостью. С одной стороны, с ростом шага скрутки h уменьшается путь вихревых токов и становится меньше сопротивление, которое оказывает им экран. В результате с ростом h возрастают и потери. С другой стороны, с ростом h уменьшается удельная значимость тангенциального поля и соответственно снижаются потери, обусловленные действием этого поля.

В левой области графика на рис. 9.18 (до характерной точки A) изменение величины R_3^{φ} подчинено закону первого фактора — с ростом h потери растут. В правой области (за точкой A) начинает превалировать действие второго фактора — тангенциальное поле уменьшается и потери снижаются.

Второй характерной точкой на графике является точка B , где шаг скрутки цепи равен периметру экрана $2\pi r_3 = h$. При этом равенстве вихревые токи в экране аксиального и тангенциального направлений равны между собой и соответственно равны вызываемые ими потери $R_3^z = R_3^{\varphi}$. Сравнивая удельную значимость сопротивления потерь R_3^z и R_3^{φ} в общей величине сопротивления потерь R_3^h , можно заметить, что при малых шагах скрутки $\frac{2\pi r}{h} > 1$, т.е. в области I доминируют потери тангенциального поля — $R_3^{\varphi} > R_3^z$. В области II при больших шагах скрутки $\frac{2\pi r}{h} < 1$ потери определяются, главным обра-

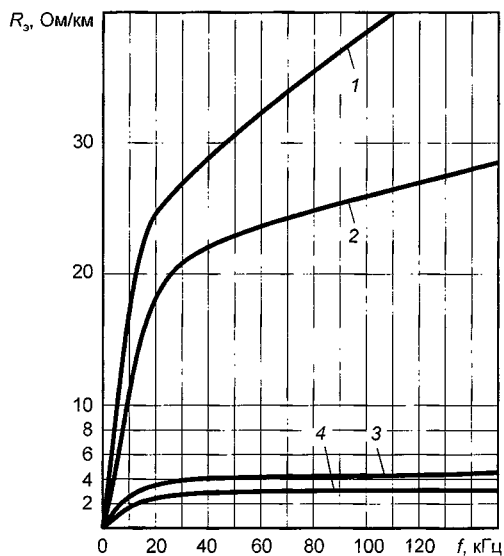


Рис. 9.19. Частотная зависимость сопротивления потерь в стальном и медном экранах для скрученных и нескрученных цепей при $t = 0,1$ мм:

- 1 — сталь ($\mu = 100$) $h = \infty$;
- 2 — сталь ($\mu = 100$) $h = 200$ мм;
- 3 — медь $h = \infty$, 4 — медь $h = 200$ мм

зом, потерями аксиального поля $R_3^z > R_3^{\varphi}$. Реальные конструкции цифровых кабелей попадают преимущественно в область II .

4. На рис. 9.19 показана частотная зависимость сопротивления потерь в медном и стальном однородных экранах толщиной 0,1 мм при скрученных и нескрученных цепях.

Из графика видно, что для скрученных цепей принципиально сохраняются те же закономерности, что и для обычных нескрученных цепей. Но по абсолютной величине сопротивление потерь скрученных экранированных цепей меньше, чем нескрученных. В реальных кабельных конструкциях цифровых кабелей $h = 20 \dots 150$ мм, потери в экранах на 10...30% меньше потерь в экранах нескрученных цепей.

5. В табл. 9.4 приведены значения R_3^h/B_3^h , характеризующие соотношение потерь в экране и экранного затухания при различных шагах скрутки (R_3 и B_3 при аксиальных экранированных цепях приняты за единицу).

Таблица 9.4. Соотношение R_3^h/B_3^h при различных шагах скрутки

$h, \text{мм}$	10	25	50	100	250	500	∞
R_3^h/B_3^h	0,003	0,3	0,7	0,79	0,94	0,97	1,0

Из приведенных данных следует, что наивыгоднейшее соотношение потерь наблюдается при малых шагах скрутки. Но в этом случае мал экранирующий эффект.

Таким образом, если оценивать цепь с точки зрения экранирующего эффекта, то следует отдать предпочтение аксиальным (нескрученным) цепям или цепям с большими шагами скрутки. В то же время известно, что скрутка кабельных групп дает значительное увеличение помехозащищенности между цепями. Поэтому в экранированных скрученных цепях будут одновременно действовать два противоречивых фактора. С одной стороны, скрутка цепей вызовет снижение экранирующего эффекта, а с другой — даст увеличение переходного затухания между цепями.

С точки зрения практики, применительно к существующим кабельным конструкциям положительный эффект, достигаемый скруткой цепей, существенно превалирует над эффектом снижения экранного затухания. Поэтому в экранированных цифровых кабелях цепи также надлежит скручивать с определенными, специально рассчитанными шагами скрутки.

9.10. Основные положения скрутки цепей в КШД

Взаимное влияние между кабельными цепями и коэффициенты электромагнитной связи обусловлены взаимным расположением токопроводящих жил, зависящим от способа их скрутки в кабеле и его производственными неоднородностями (различие диаметров жил, неоднородная изоляция и т.д.), практически не поддающимся предварительному учету [9].

Скрутка жил в группы, а групп в общий сердечник кабеля подчинены задаче уменьшения электромагнитных связей и взаимных влияний между кабельными цепями.

В кабельных цепях различают следующие связи:

- а) *внутригрупповые* (связи между цепями одной и той же группы);



б) *смежные* (связи между цепями различных групп, расположенных в одном пучке);

в) *между пучками* (связи между цепями групп, расположенных в различных пучках).

Коэффициенты емкостной и индуктивной связи выражаются через расстояние между влияющей (1–2) и подверженной влиянию (3–4) цепями следующими соотношениями (рис. 9.20, а):

– индуктивная связь

$$m = N_1 \ln \frac{r_{14} r_{23}}{r_{13} r_{24}}; \quad (9.55)$$

– емкостная связь

$$k = N_2 C_{12} C_{34} \ln \frac{r_{14} r_{23}}{r_{13} r_{24}}, \quad (9.56)$$

где r — расстояние между цепями с соответствующими индексами; N_1 и N_2 — коэффициенты пропорциональности, обусловленные изолирующей средой; C_{12} и C_{34} — емкости между жилами с соответствующими индексами.

Из формул (9.55) и (9.56) видно, что емкостная и индуктивная связи пропорциональны друг другу, поэтому соответствующим расположением проводов можно их уменьшить одновременно.

Условие отсутствия емкостной и индуктивной связей:

$$\ln \frac{r_{14} r_{23}}{r_{13} r_{24}} = 0. \quad (9.57)$$

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы

$$r_{14} = r_{13}; r_{23} = r_{24},$$

или

$$r_{14} = r_{24}; r_{23} = r_{13}. \quad (9.58)$$

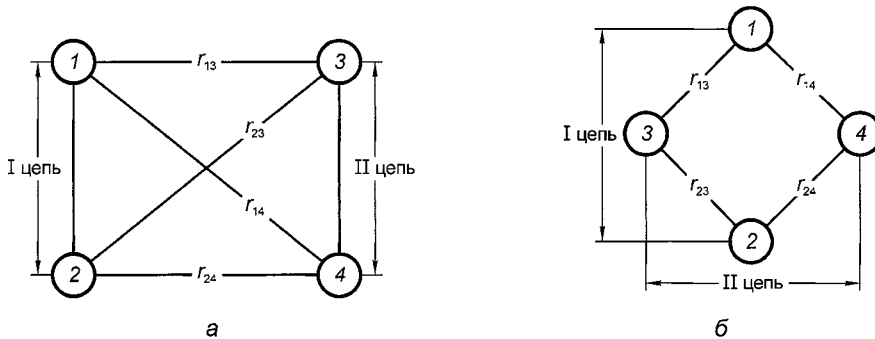


Рис. 9.20. Расположение влияющей и подверженной влиянию цепей:
а — парная скрутка; б — четверочная (звездная) скрутка

Достаточно также, чтобы соблюдалось следующее равенство:

$$r_{14}r_{23} = r_{13}r_{24}. \quad (9.59)$$

Нетрудно заметить, что это условие автоматически реализуется при «звездной» скрутке, когда влияющая цепь (жилы 1–2) и цепь, подверженная влиянию (жилы 3–4), расположены во взаимно-перпендикулярных (рис. 9.20, б) осях.

Здесь провод 1 в силу равенства расстояний $r_{13} = r_{14}$ влияет с одинаковой силой как на провод 2, так и на 4. Поэтому в проводах 3 и 4 наводятся разнонаправленные токи одинаковой величины, и результирующий ток помех в цепи 3–4 равен нулю. Также не сказывается влияние провода 2 на цепь 3–4, причем это условие справедливо безотносительно к шагам скрутки.

Принципиально «звездная» скрутка жил четверки обеспечивает отсутствие внутригрупповых связей (между цепями 1–2 и 3–4). При этой скрутке внутригрупповые связи обуславливаются лишь допусками и неоднородностями производственного характера, а не шагом скрутки четверки.

Связи между звездными четверками (смежные связи) в значительной мере зависят от соотношения шагов скрутки четверок.

При парной скрутке расстояния между жилами влияющей и подверженной влиянию цепей непрерывно меняются вдоль кабеля, и для достижения минимума влияния требуется специальное согласование шагов скрутки. Это относится как к влиянию внутри групп, так и между группами.

Возможны два метода согласования шагов и выполнения условия

$$r_{13}r_{24} = r_{14}r_{23}:$$

- 1) метод поперечной симметрии;
- 2) метод продольной симметрии.

Поперечная симметрия между цепями достигается свиванием влияющей и подверженной влиянию цепей с одинаковыми шагами, но со сдвигом фаз в 90° .

Как видно из рис. 9.21, в каждый данный момент цепи I и II расположены на взаимно-перпендикулярных осях, чем обеспечивается равенство $r_{13}r_{24} = r_{14}r_{23}$, и влияние между цепями сводится к минимуму. Этот метод не нашел значительного применения, так как в производстве крайне не удобен и не пригоден для большого числа цепей.

Идея согласования шагов скрутки и эффективность их специального подбора могут быть пояснены следующим образом. На рис. 9.22, а представлены две параллельно расположенные цепи: влияющая (жилы 1–2) и подверженная влиянию (жилы 3–4). Ток I_1 в проводе 1 индуцирует токи помех I_{13} и I_{14} в проводах 3 и 4. Так как провод 3 расположен к проводу 1 ближе, чем

провод 4, то ток I_{13} больше тока I_{14} , и в цепи II установится разностный ток $I_{13} - I_{14}$.

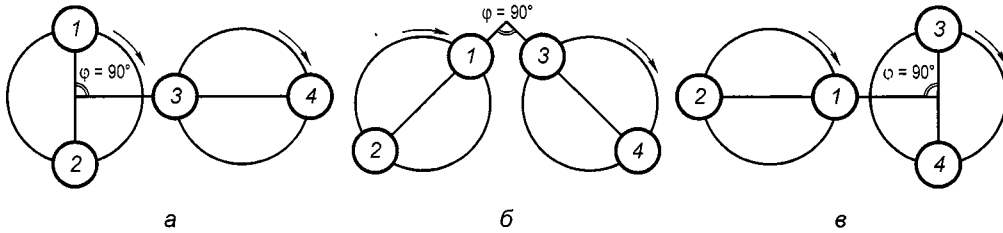


Рис. 9.21. Скрутка по методу поперечной симметрии: а — 1-е положение; б — 2-е положение; в — 3-е положение

Аналогично действует ток I_2 , протекающий во втором проводе, создавая уравнительный ток $I_{23} - I_{24}$. Эти уравнительные токи проявляются в приемных аппаратах цепи II в виде мешающих влияний.

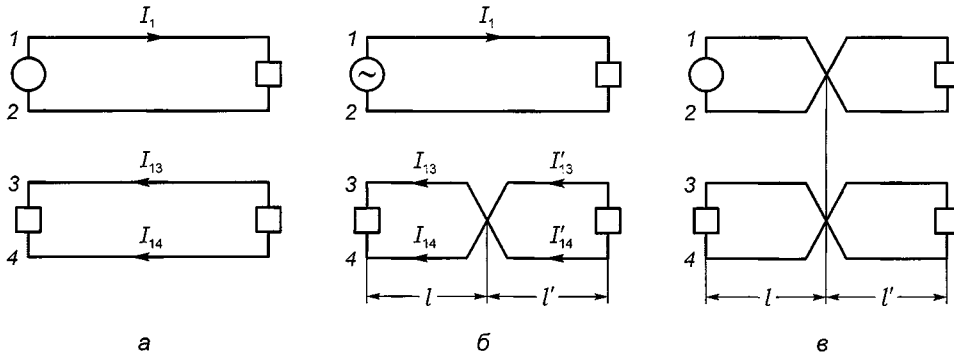


Рис. 9.22. Эффективность скрещивания цепей: а — нескрещенные цепи; б — положительный эффект скрещивания; в — скрещивание не дает эффекта

Рассмотрим влияние между цепями в случае, если одна из цепей, например II, скрещена в середине.

Как видно из рис. 9.22, б, в проводе 3 появится ток $I_{13} + I'_{14}$, а в проводе 4 — ток $I_{14} + I'_{13}$, причем на участке l ток в проводе 3 (I_{13}) больше тока в проводе 4 (I_{14}), а на участке l' , наоборот, ток в проводе 3 (I'_{14}) меньше тока в проводе 4 (I'_{13}).

Так как участки скрещивания одинаковы ($l = l'$), то суммарные токи помех в проводах 3 ($I_{13} + I'_{14}$) и 4 ($I_{14} + I'_{13}$) будут равны, но направлены на-

встречу друг другу, и поэтому их действие в приемной аппаратуре сведется к нулю.

Таким же образом взаимно компенсируются токи в проводах 3 и 4, создаваемые током I_2 , протекающем в проводе 2.

Следовательно, перемена места проводов одной из цепей (скрещивание) в общем случае устраняет мешающие влияния между цепями.

Указанный эффект скрещивания основан на равенстве токов на участках l и l' , однако в действительности вследствие затухания токов вдоль линии токи в ее начале больше, чем в конце ($I_{13} > I'_{14}$ и $I_{14} > I'_{13}$) и их полной взаимокompенсации в проводах 3 и 4 не произойдет. В приемном аппарате цепи II появится уравнивающий ток помех $(I_{13} + I'_{14}) - (I_{14} + I'_{13})$.

Если скрестить цепь не в одной точке, а в нескольких, эффект будет лучше. Чем чаще скрещивать провода цепи, тем меньше разница между величинами токов соседних участков и меньше мешающее влияние между цепями.

Нетрудно заметить, что если скрестить не одну, а обе цепи в одной точке, то кресты нейтрализуют друг друга, и эффект скрещивания исчезает (рис. 9.22, в).

Поэтому кресты дают положительный эффект лишь при скрещивании цепей с различными шагами (шаг скрещивания — расстояние между двумя соседними точками скрещивания).

Следует отметить, что если шаги скрещивания цепей между собой не согласованы, то образуется неуравновешенный участок линии (рис. 9.23), вызывающий дополнительное влияние между цепями, причем, чем он длинней, тем влияние больше. Если на участках l и l' происходит взаимная компенсация токов помех, то неуравновешенная длина l'' действует как нескрещенная цепь и создает влияние между цепями.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что скрещивание эффективно лишь при специально рассчитанных шагах, различных для разных цепей, причем, чем чаще скрещивание, тем эффект больше.

Принципиально кабельная скрутка аналогична скрещиванию, но последнее осуществляется переменной мест (транспозицией) проводов в точке, а скрутка представляет собой равномерно распределенную транспозицию проводов по длине кабеля.

Скрещивание применяется, главным образом, на воздушных линиях связи и сильном токе, однако его основные законы справедливы и для кабельной скрутки.

В принципе каждая кабельная цепь должна скручиваться с различным шагом скрутки. Напоминаем, что под шагом скрутки h понимается длина, на которой изолированная жила цепи или группа описывает полный круг

по оси скручивания (рис. 9.24). Эффект скрутки тем больше, чем меньше шаг h .

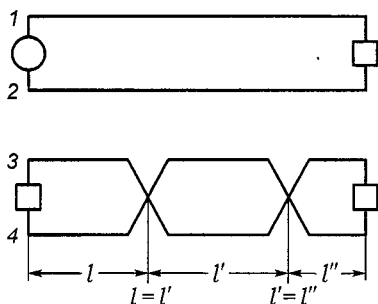


Рис. 9.23. Неуравновешенная линия

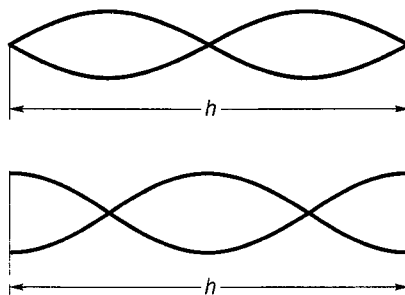


Рис. 9.24. Шаг скрутки

Подбор и согласование шагов скрутки различных цепей и кабельных групп производится по участкам, называемым *секциями симметрирования*, или *защиты*. Секция защиты l_s — отрезок кабеля, на протяжении которого осуществляется полный цикл защиты от помех кабельных цепей.

Секция защиты связана с шагом скрутки следующим соотношением:

$$l_s = h_1 h_2 / B, \quad (9.60)$$

где B — наибольший общий делитель h_1 и h_2 .

Например, если имеются две цепи, скрученные с шагами $h_1 = 30$ и $h_2 = 50$ мм, то наибольший общий делитель $B = 10$ и

$$l_s = \frac{30 \cdot 50}{10} = 150 \text{ мм}. \quad (9.61)$$

Как показано на рис. 9.25, на участке $l_s = 150$ мм совершается полный цикл защиты от помех (симметрирования) между двумя рассмотренными цепями.

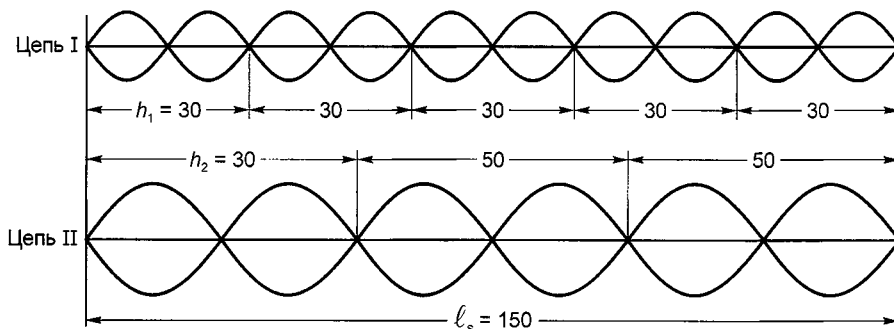


Рис. 9.25. Секция взаимозащитенности двух цепей

В пределах этой длины кабеля l_s положение жил в парах по отношению друг к другу, а вместе с тем и расстояние между жилами $r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{24}$ постоянно меняются, причем в конце отрезка кабеля l_s получается такое же положение жил, как и в его начале. На втором и всех последующих отрезках кабеля длиной l_s повторяются все положения жил. Поэтому достаточно рассмотреть один лишь цикл защиты на участке.

На рис. 9.26, где показан характер изменения расстояний между жилами двух цепей на отрезке кабеля l_s , видно, что эти расстояния являются функцией длины кабеля l , причем функция $r_{14}(l)$, взятая на отрезке l_1 , обнаруживает такие же изменения, как функция $r_{24}(l)$ на отрезке l_2 . Функция $r_{13}(l)$ в интервале l_1 равна функции $r_{23}(l_2)$ в интервале l_2 . В середине секции защиты l_s в точке A происходит взаимная перемена расстояний между жилами.

Следовательно, на участке кабеля длиной l_s выполняется соотношение между функциями

$$r_{14}(l)r_{23}(l) = r_{24}(l)r_{13}(l). \tag{9.62}$$

Когда $\ln \frac{r_{14}r_{23}}{r_{24}r_{13}} = 0$ отсутствуют емкостные k и магнитные m связи, а мешаю-

щее влияние между цепями I и II сводится к минимуму. Причем, если при поперечной симметрии условие отсутствия емкостных и индуктивных связей выполнялось в любой точке сечения кабеля, то при продольной симметрии оно реализуется лишь на длине кабеля, равной секции защиты l_s .

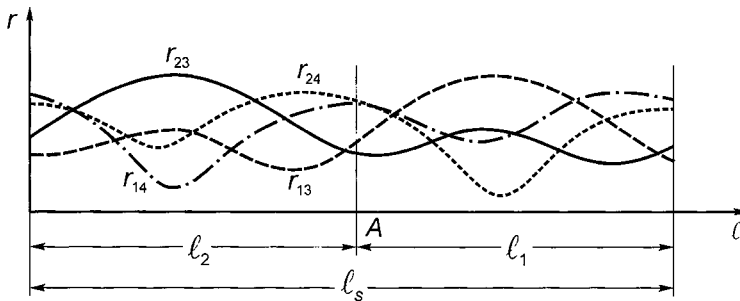


Рис. 9.26. Изменение расстояний между жилами двух цепей на отрезке кабеля

Очевидно, что в идеальном случае для защиты цепей от помех строительная длина кабеля должна содержать целое число секций защиты. Практически это требование не может быть реализовано ни в производстве, ни в прокладке и монтаже кабеля. Поэтому стремятся хотя бы к возможному уменьшению участков кабеля, остающихся неуравновешенными. С этой целью длину секции защиты l_s выбирают как можно меньше и тогда, разрезав ка-

бель в любом месте, получают сравнительно короткие неуравновешенные участки.

Уменьшение секции защиты влечет за собой также уменьшение шагов скрутки кабеля h , что выгодно также и в электрическом отношении, так как чем меньше шаг скрутки, тем больше эффект скрутки и выше помехозащищенность цепей. Однако принятие очень коротких шагов скрутки связано с производственно-техническими соображениями, так как чем короче шаг скрутки, тем больше объем кабеля, абсолютная длина жил и, естественно, себестоимость.

Практика показывает, что в кабелях на основе «витых» пар целесообразно выделить несколько возможных диапазонов величин шагов скрутки групп в зависимости от возможного частотного диапазона применения кабелей (табл. 9.5).

Таблица 9.5. Диапазоны шагов скрутки

Номер	Диапазон частот, кГц	Диапазон шагов скрутки, мм
I	1...10	150...300
II	10...100	50...150
III	100...2000	30...50
IV	2000...100 000	10...30

В кабелях связи шаги скрутки всех кабельных групп должны быть согласованы между собой, и это особенно важно для соседних групп в пределах одного пучка.

Вместе с тем согласование шагов скрутки групп весьма желательно и между остальными группами кабеля, так как за счет индуктивной связи помехи проникают и в отдаленные группы кабеля.

Влияние емкостного характера существует лишь между близлежащими группами, так как емкостная связь более отдаленных групп ничтожно мала. Емкостные связи двух групп, разделенных между собой третьей, не имеют значения даже, если шаги их скрутки не согласованы между собой. Промежуточные группы кабеля действуют на емкостные влияния как электростатический экран и принимают на себя электрическое поле помех. Таким образом, в низкочастотных кабелях, в которых взаимовлияние между цепями обусловлено практически только емкостными связями, можно согласовывать шаги скрутки лишь у соседних групп кабеля. Поэтому достаточно принять два различных, согласованных между собой шага скрутки, и чередовать их. Так, в элементарном пучке с 10 группами (парами) — пять групп с нечетны-

ми номерами скручиваются с шагом h_1 , а остальные группы с четными номерами — с шагом h_2 . В случае нечетного числа групп в пучке необходимо иметь еще третий, согласованный шаг скрутки h_3 .

В высокочастотных (цифровых) кабелях согласованные шаги скрутки должны иметь все группы элементарного пучка (сердечника). Шаги скрутки элементарных пучков нет необходимости согласовывать.

При наличии в кабеле экранированных групп следует иметь в виду, что экран полностью локализует лишь емкостное влияние между цепями. Магнитное поле помех экранирующая оболочка уменьшает лишь частично, поэтому согласование шагов скрутки необходимо осуществлять и для этих групп. Следует отметить, что наличие экранированных групп в кабеле ухудшает симметрию цепей по отношению к земле и несколько снижает эффект согласования шагов скрутки. Для устранения вредного воздействия экрана экранированные группы следует располагать в центре пучков (сердечника).

Расчет и согласование шагов скрутки для цифровых кабелей производится с помощью следующих формул:

а) для цепей парной скрутки, расположенных в одном пучке

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{2\nu \pm 1}{4w}; \tag{9.63}$$

б) для групп звездной скрутки, расположенных в одном пучке

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{4\nu \pm 1}{4w}, \tag{9.64}$$

где h_1 и h_2 — шаги скруток согласуемых групп; ν и w — любые целые числа больше нуля.

Любой из приведенных шагов обеспечивает должную помехозащищенность цепей кабеля, но для уменьшения влияния неуравновешенных длин следует выбирать такие шаги скрутки h , при которых секция защиты l_5 получается наименьшей. Кроме того, желательно, чтобы все принятые шаги укладывались в определенный диапазон (см. табл. 9.5).

9.11. Выбор вида скрутки изолированных жил в группы

Так что же выбрать для скрутки цифровых кабелей: «пару» или «четверку»? Этот вопрос на протяжении многих лет неизменно возникал у специалистов в области кабельной науки и промышленности.

За более чем 100-летний период научная мысль кабельной техники не дала однозначного ответа. Так и остались они двумя соперничающими между собой элементарными группами.

Симметричная парная скрутка была предложена Ф. Лжакобом в 1882 г. и впервые внедрена в конце 1880-х гг. В пару скручиваются две изолированные жилы, образующие физическую цепь (рис. 9.27, а). В четверку одновременно скручиваются четыре жилы, образующие группу из двух цепей (способ запатентован в 1886 г. и практически осуществляется с 1891 г.). При этом каждая цепь четверки (рис. 9.27, б, в) формируется не из рядом лежащих жил, например 1, 3, и 2, 4, а из противоположащих жил, т.е. 1–2 и 3–4. Скрученная четверка по форме напоминает четырехлучевую звезду и поэтому называется *звездной*. Возможность диагонального формирования цепей, обусловленная конструкцией группы, скрученной сразу из четырех жил, привела к изменению электрических параметров четверки по сравнению с парой. Прежде всего увеличилось расстояние a между жилами цепи: при парной скрутке $a_{\text{п}} = d_{1\text{п}}$ (см. рис. 9.27, а), а при скрутке в четверку $a_{\text{ч}} > d_{1\text{ч}}$. Из рис. 9.27, б следует, что $a^2 = 2d_1^2$, значит $a_{\text{ч}} = \sqrt{2}d_{1\text{ч}} = 1,414d_{1\text{ч}}$. При одинаковых диаметрах токопроводящих и изолированных жил (т.е. $d_{0\text{п}} = d_{0\text{ч}}$; $\delta_{\text{из.п}} = \delta_{\text{из.ч}}$; $d_{1\text{п}} = d_{1\text{ч}}$ и $\xi_{\text{п}} = \xi_{\text{ч}}$) рабочая емкость кабелей четверочной скрутки будет примерно на 15% меньше, чем при парной скрутке.

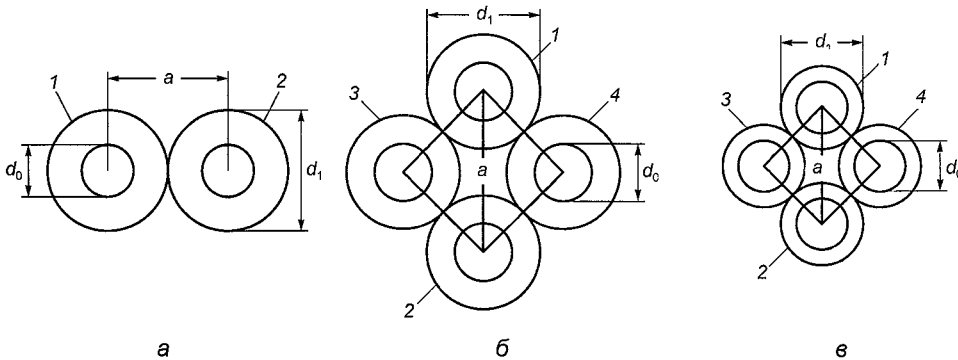


Рис. 9.27. Схематические изображения элементарных групп с одинаковыми диаметрами токопроводящих жил ($d_0 = \text{const}$):
 а — пара ($\delta_{\text{из.п}}, C_{\text{п}}$); б — четверка ($\delta_{\text{из.ч}} = \delta_{\text{из.п}}, C_{\text{ч}} < C_{\text{п}}$);
 в — четверка ($\delta_{\text{из.ч}} < \delta_{\text{из.п}}, C_{\text{ч}} = C_{\text{п}}$)

Запишем формулу (9.39) с учетом рекомендаций по части ψ применительно к обоим видам скрутки:

$$C_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_{r,\text{эк.п}} \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2d_{1\text{п}}}{d_0} 0,75} \quad \text{и} \quad C_{\text{ч}} = \frac{\varepsilon_{r,\text{эк.ч}} \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2 \cdot 1,41 \cdot d_{1\text{ч}}}{d_0} 0,65}$$

Если принять $\xi_{II} = \xi_{IV} = 2$, а C_{II} за 100%, то $C_{IV} = 85\%$ (в предположении, что $\epsilon_{r,эк. II} = \epsilon_{r,эк. ч}$). Уменьшение рабочей емкости и, следовательно, коэффициента затухания четверки (на 7–8%) по сравнению с парой достигнуто автоматически при сохранении объема проводникового и изоляционного материалов. В результате на 7–8% может быть увеличена дальность связи по кабелям. Указанный автоэффект четверки можно использовать и в другом направлении: сохранить неизменным (по сравнению с парной скруткой) значение рабочей емкости, но благодаря этому уменьшить толщину изоляции. Если $C_{II} = C_{IV}$, то (естественно при $\epsilon_{r,эк. II} = \epsilon_{r,эк. ч}$) $\ln 1,5\xi_{II} = \ln 1,83\xi_{IV}$, откуда $\xi_{IV} = 0,82\xi_{II}$. Это значит, что при равенстве диаметров токопроводящих жил диаметр изолированной жилы в четверке может быть на 18% меньше, чем в паре. Следовательно, можно существенно уменьшить толщину изоляции жил в четверке при условии одинаковых электрических параметров кабелей парной и четверочной скрутки.

Одно из преимуществ четверочной скрутки по сравнению с парной как раз и заключается в возможности уменьшения габаритов изоляции и, следовательно, кабелей в целом без ухудшения их электрических параметров. Благоприятными следствиями этого являются:

а) сокращение расхода изоляционных, экранирующих и защитных материалов, следовательно, уменьшение общей стоимости кабелей;

б) размещение большого числа цепей в сердечниках при равенстве наружных диаметров кабелей четверочной и парной скрутки, следовательно, лучшее использование пространства кабельного трубопровода, возможность увеличения максимального числа цепей в кабелях;

в) уменьшение общей массы кабелей, следовательно, облегчение и удешевление их транспортировки и прокладки.

Однако наряду с органическими достоинствами четверочной скрутке присущи и определенные, также органические, недостатки по сравнению с парной скруткой. Самый крупный из них — худшая взаимная помехозащищенность соседних цепей. Для уменьшения взаимных влияний соседние цепи должны иметь различные, согласованные между собой шаги скрутки. При скрутке жил в пары это легко осуществить. В четверке все четыре жилы, а значит и обе ее цепи скручены с одним общим шагом. Следовательно, взаимное влияние между цепями внутри четверки неизбежно сильнее, чем между соседними парами. Степень взаимного влияния между цепями четверки определяется другим фактором — степенью геометрической и, следовательно, емкостной симметрии четверки, т.е. в первую очередь равенством расстояний между всеми ее жилами, и характеризуется коэффициентом емкостной связи k_1 , Ф/км:

$$k_1 = [(C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23})] \cdot 10^{-12},$$

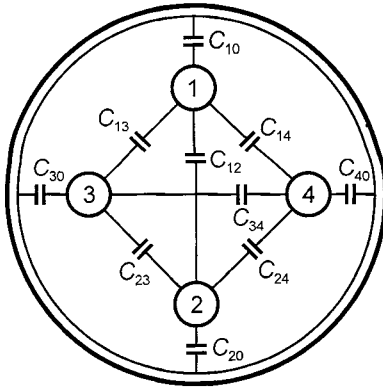


Рис. 9.28. Схема частичных емкостей между жилами обеих цепей четверки C_{jk} и между жилами и землей C_{j0}

где C_{13} , C_{24} , C_{14} и C_{23} — частичные емкости между жилами четверки (рис. 9.28), а также емкостной асимметрией жил каждой цепи на землю: $e_1 = C_{10} - C_{20}$ и $e_2 = C_{30} - C_{40}$.

Чем меньше различаются частичные емкости, тем меньше коэффициент емкостной связи k_1 (соответственно меньше e_1 и e_2) и тем самым меньше взаимное влияние между обеими цепями, а значит выше значение переходного затухания.

При прочих равных условиях (одинаковые диаметры токопроводящих жил, одинаковый материал изоляции всех жил, т.е. одинаковая ее диэлектрическая проницаемость) частичные емкости зависят от расстояния между жилами (между центрами жил). Следовательно, эти расстояния в четверке должны быть по возможности одинаковыми на протяжении всей длины кабеля. Практически добиться идеальной симметрии четверки весьма не легко. Требуемая степень симметрии в высокочастотных симметричных кабелях дальней связи обеспечивается целым рядом конструктивно-технологических мероприятий, естественно усложняющих и удорожающих производственный процесс. Первостепенными из них являются ужесточенные допуски на диаметры токопроводящих жил и размеры изоляционных материалов (корделя, ленты), т.е. на толщины изоляции, а также ужесточенный операционный контроль. При этом соседние цепи в кабелях парной скрутки лучше защищены от взаимных влияний, чем цепи внутри четверок в кабелях звездной скрутки. Соответствующие коэффициенты связи в первых кабелях в несколько раз меньше, чем во вторых. Измерения показывают, что это соотношение колеблется от 1...2 до 1...5 в зависимости от уровня технологии производства. В некоторых странах вообще не считают необходимым нормировать коэффициенты связи в кабелях парной скрутки исходя из того, что надлежащая помехозащищенность будет обеспечиваться автоматически при согласовании шагов скрутки, тогда как в кабелях четверочной скрутки нормирование коэффициента k_1 обязательно. Значение k_1 нормируется в пикофарадах чаще всего на типовую строительную длину или на единицу длины 1 км.

На рис. 9.29 сопоставлены частотные зависимости переходных затуханий на ближнем и дальнем концах кабелей парной и четверочной скрутки с поли-

этиленовой изоляцией. Как следует из рисунка, наихудшей помехозащищенностью обладают цепи, принадлежащие одной четвертке. Переходное затухание между соседними парами примерно на 10% выше. Кроме того, переходное затухание между цепями четвертки с ростом частоты уменьшается несколько быстрее.

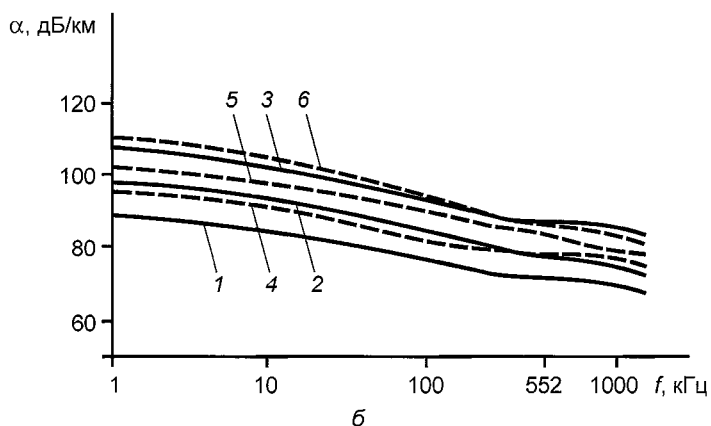
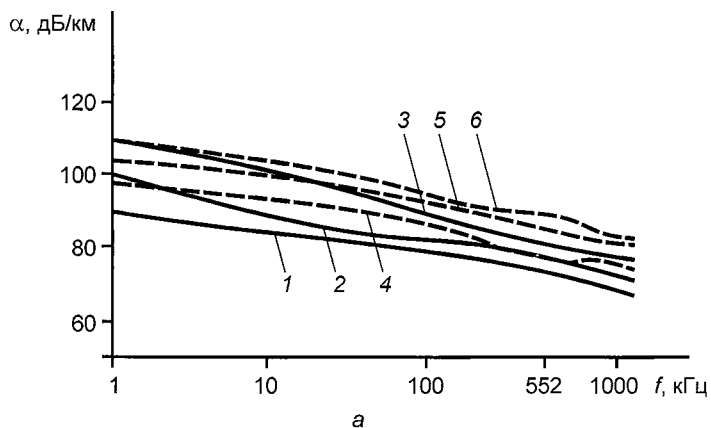


Рис. 9.29. Переходные затухания на ближнем (а) и дальнем (б) концах кабелей 150×2×0,64 (---) и 50×2×0,64 (—) с полиэтиленовой изоляцией:
 1 — пары в одной четвертке; 2 — пары в соседних четвертках; 3 — пары в четвертках, расположенных через одну; 4 — соседние пары; 5 — пары, расположенные через одну; 6 — пары, расположенные через две

Другим недостатком четверочной скрутки является меньшая механическая и электрическая прочность изоляции жил сравнительно с жилами кабелей парной скрутки. Парадокс состоит в том, что основное достоинство четверочной скрутки — меньшая толщина изоляции — одновременно обуславливает и названный недостаток. В более тонкой изоляции ощутимо проявляется вредное влияние загрязнений, она более уязвима к различного рода механическим воздействиям. Процент брака при испытании электрической прочности изоляции в кабелях при четверочной скрутке несколько выше, чем при парной.

Так как в четверке эффект близости проявляется сильнее, чем в паре, то в случае цифровых систем уплотнения с увеличением частоты активное сопротивление цепей в кабелях четверочной скрутки растет быстрее, чем в кабелях парной скрутки. По некоторым данным на частоте 1 МГц это превышение составляет 13...14%, что соответственно обуславливает увеличение коэффициента затухания.

Производительности современных машин для скрутки жил в пары и четверки, приведенные к одинаковому числу цепей, примерно равны. Все же при четверочной скрутке в технологический цикл приходится вводить дополнительную контрольную операцию проверки коэффициента емкостной связи k_1 у всех четверок перед комплектованием их для скрутки в пучки или в сердечники.

Трудоемкость сращивания кабелей парной и четверочной скрутки примерно одинаковая, если не приходится симметрировать четверки. При необходимости симметрирования четверок трудоемкость их сращивания в 2,2...2,5 раза больше, чем в случае сращивания пар. Так как практически не удается полностью избежать симметрирования четверок, то следует считать операцию сращивания кабелей четверочной скрутки в среднем более трудоемкой по сравнению со сращиванием кабелей парной скрутки.

При конструировании новых кабелей выбирать вид скрутки жил в группы надлежит применительно к конкретным условиям производства с учетом всех перечисленных факторов, сжатое сопоставление которых дает табл. 9.6, составленная по условно-качественным признакам. Исходя из конкретного опыта отечественной кабельной промышленности и, принимая во внимание все вышесказанное, особенно относительно разрабатываемых конструкций цифровых кабелей и перспектив применения DSL-систем на современном этапе, все же следует отдать предпочтение парной скрутке.

Таблица 9.6. Качественное сравнение четверочной и парной скрутки жил в группы

Наименование сопоставляемого параметра	Взаимное соотношение параметров	
	четверочная скрутка	парная скрутка
При одинаковой толщине изоляции: рабочая емкость коэффициент затухания на низких частотах	<i>Преимущества</i> Меньше Меньше	<i>Недостатки</i> Больше Больше
При одинаковой рабочей емкости: толщина изоляции наружный диаметр кабеля масса кабеля стоимость кабеля число цепей в кабеле	Меньше Меньше Меньше Меньше Больше	Больше Больше Больше Больше Меньше
Взаимная помехозащищенность соседних цепей	<i>Недостатки</i> Меньше	<i>Преимущества</i> Больше
При одинаковой рабочей емкости: механическая прочность электрическая прочность коэффициент затухания на высоких частотах	Меньше Меньше Меньше	Больше Больше Больше
Трудоемкость монтажа	Больше	Меньше

Глава 10. Основы конструирования универсальных КШД

10.1. Системный подход к конструированию КШД

Проблема оптимизации — одна из центральных в современной науке и технике. Каждый инженер-конструктор, решая любую задачу конструирования, всегда пытается найти наилучший (или, как принято говорить, оптимальный) вариант.

Научный подход к проблеме оптимизации базируется на принципах системотехники, исследовании операций, математическом программировании и моделировании.

Задача оптимизации КШД весьма актуальна, ибо в современных ЦСП оконечные устройства (ОУ) и КШД — наиболее дорогостоящая часть, а КШД, в свою очередь, наиболее дорогостоящая часть этой системы.

В предлагаемой книге сделана попытка изложить основные положения и понятия теории, достаточные для понимания методов оптимизации.

Для решения задачи оптимизации конструкции КШД необходимо выяснить зависимость стоимости кабеля от его электрических характеристик, т.е. фактически оптимизировать величину широко известного критерия «эффективность–стоимость».

Определение зависимости стоимости кабеля от электрических характеристик может быть осуществлено лишь путем предварительного выражения их через конструктивные параметры, стоимостная оценка которых не представляет принципиальных трудностей.

В общем случае объектом комплексного технико-экономического анализа могут служить как параметры передачи, так и параметры влияния. Имеется вполне обоснованное предположение [16] о том, что в используемом для уплотнения диапазоне частот при заданных конструкции кабеля, технологии изготовления, допусках, схеме организации связи технико-экономические показатели линий связи в первом приближении можно принять независимыми от величин параметров взаимного влияния кабеля либо учесть их с помощью некоторого коэффициента сложности.

Из параметров передачи наибольший интерес с технико-экономической точки зрения представляет коэффициент затухания, определяющий при

прочих равных условиях длину линии или частоту установки промежуточных усилителей.

Процесс поиска оптимального решения при конструировании включает ряд этапов.

I. Постановка задачи, выбор объекта и цели исследования. Пусть поставлена задача конструирования серии малопарных цифровых кабелей для абонентских линий (объект исследования) с тем, чтобы вся серия была оптимальна по суммарной стоимости или по расходу дефицитного материала, например, меди, или по какому-нибудь другому параметру (цель исследования).

II. Параметры объекта. Согласно [20] оптимизируемый объект характеризуется набором внешних и внутренних параметров, обозначаемых соответственно через y_i и x_i . *Внешние параметры* описывают объект в плане его применения, эксплуатации. К ним относятся прежде всего электрические параметры цифрового кабеля, его габариты, масса, стоимость, количество цепей, возможность применения определенного типа аппаратуры DSL, защищенность от взаимных и внешних влияний и т.д. Внешние параметры могут характеризовать данную систему как подсистему, как часть другой системы более высокого иерархического уровня. Например, кабель ШД — часть системы абонентских линий городской телефонной сети (ГТС), а последняя сама представляет собой часть ГТС.

Внутренние параметры описывают кабель как бы с позиций его разработчика, конструктора. К внутренним параметрам КШД могут быть отнесены материалы токопроводящих жил, изоляции, оболочки, вид скрутки изолированных жил в группы, размеры конструктивных элементов — диаметр токопроводящих жил, экрана, оболочки и т.п. Таким образом, состав и значения внутренних (управляемых) параметров определяются непосредственно в процессе оптимального конструирования.

Внешние и внутренние параметры, выраженные численно, могут принимать как непрерывное, так и дискретное множество значений. Совокупности параметров y_i и x_i образуют векторы внешних и внутренних параметров:

$$y = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

III. Формулирование критерия оптимальности и выбор оптимизируемых параметров. КШД должен оптимизироваться по количественно определенному единственному критерию, отражающему в математической форме цель исследования. Критерий оптимальности, представленный в виде функции оптимизируемых параметров кабеля, называется *целевой функцией*. Особо следует отметить принцип единственности критерия оптимальности. Как правило, нельзя оптимизировать кабель одновременно по двум показате-

лям. Например, невозможно одновременно достигнуть минимальной электрической рабочей емкости цепей и минимальных габаритов кабеля. Можно достигнуть минимума рабочей емкости при заданных габаритах кабеля или минимальных габаритов при заданной рабочей емкости или заданном коэффициенте затухания. В качестве оптимизируемых параметров КШД могут быть приняты диаметры токопроводящих жил при поиске минимального расхода меди, соотношения диаметров изолированной и токопроводящей жил при поиске минимальной стоимости кабеля, толщины оболочек и экранов при их минимизации с соблюдением требований к коэффициенту защитного действия и механическим параметрам. Вместе с тем следует отметить, что при оптимизации кабелей и линий связи наиболее часто в качестве критерия оптимальности принимаются стоимостные показатели.

IV. Учет накладываемых ограничений. Любая система оптимизируется в условиях количественно определенных ограничений на оптимизируемые параметры. В случае оптимизации КШД эти ограничения можно условно разбить на несколько групп.

1. Ограничения, вытекающие из физического смысла параметров. Например, диаметр токопроводящей жилы и толщина изоляции — всегда положительные величины, т.е. $d_0 > 0$ и $\delta_{из} > 0$. Диаметр изолированной жилы всегда больше диаметра токопроводящей жилы: $d_1 > d_0$.

2. Организационно-технологические ограничения, обусловленные доступностью исходных материалов, возможностями производства кабелей (наличием оборудования, уровнем технологии). Ими могут быть, например, ограничения на толщину изоляции — минимальную по условиям изготовления и максимальную по возможностям монтажа кабелей, зависящим, в частности, от применяемых соединителей.

3. Ограничения, определяемые требованиями к качеству связи: заданные значения или области допустимых изменений вторичных и первичных параметров передачи, взаимного влияния, экранирования.

4. Ограничения, следующие из взаимодействия кабеля с другими элементами сети. Например, ограничения габаритов кабеля для возможности его прокладки в канализации или нормирование минимального радиуса изгиба кабеля для возможности его выкладки в смотровых устройствах.

Математически ограничения на внешние и внутренние параметры записываются соответственно системами равенств и неравенств вида

$$y_1 = a; y_2 \leq b; y_3 \geq c.$$

V. Построение математической модели. С математической точки зрения внутренние параметры играют роль независимых переменных задачи конструирования и однозначно определяют значения внешних параметров, кото-

рые, в свою очередь, оценивают эффективность объекта (системы) в целом. Внешние и внутренние параметры объекта оптимизации связаны конкретными зависимостями. Каждый из внешних параметров оптимизируемой системы можно представить в виде функции ее внутренних параметров. Например, для КШД:

а) рабочая емкость

$$C = y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $x_1 = d_1$; $x_2 = \delta_{из}$; $x_3 = \epsilon_{r,эк}$; $x_4 = a$; $x_5 = \psi$;

б) электрическое сопротивление жилы постоянному току

$$R_{ж} = y_2 = f_2(x_1, x_2),$$

где $x_1 = d_0$; $x_2 = \rho$.

(В уравнении для сопротивления переменному току следует учитывать еще члены, характеризующие поверхностный эффект и эффект близости, потери в остальных жилах кабеля, оболочке или экране и др.);

в) наружный диаметр

$$D_{нар} = y_3 = f_3(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $x_1 = d_0$; $x_2 = \delta_{из}$; $x_3 = f_{гр}$; $x_4 = F$; $f_{гр}$, F — коэффициенты скрутки; $x_5 = \sum_{i=1}^m t_i$;

t_i — толщина слоя соответствующего покрова, расположенного поверх сердечника: поясной изоляции, экрана, оболочки, брони и т.д.

Равенства вида

$$y_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$$

называются *уравнениями связи между внешними и внутренними параметрами*. Они отображают структуру системы, основные, присущие данной системе закономерности, взаимное влияние технических и экономических показателей системы и т.д. и выполняют роль математической модели конструируемого кабеля.

Представление внешних параметров через внутренние — наиболее удобная форма задания математической модели, так как позволяет непосредственно выразить показатель эффективности системы через ее внутренние параметры.

VI. Целевая функция. Эффективность конструкции кабеля зависит от его внешних параметров и характеризуется целевой функцией

$$v(y) = v(y_1, y_2, \dots, y_m).$$

Целевая функция зависит не только от внешних, но и от внутренних параметров, однако последние не входят в явном виде в целевую функцию, влияют на нее через внешние параметры.

Задача оптимального конструирования заключается в том, чтобы определить значения n независимых внутренних параметров, которые оптимизируют (минимизируют или максимизируют) целевую функцию

$$v(y) = \lambda(x) = \lambda(x_1, x_2, \dots, x_m) \rightarrow (\max, \min)$$

и дополнительно удовлетворяют p уравнениям (неравенствам или равенствам) вида

$$q_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq b_i \text{ или } < b_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, p$.

Часто целевая функция просто равна одному из внешних параметров или его обратной величине:

$$v(y) = y_i; \quad v(y) = 1/y_i.$$

Все остальные $(m - 1)$ внешних параметров переводится в систему ограничений. Физический смысл целевой функции в этом случае заключается в том, что чем больше (или меньше) параметр y_i , тем лучше при прочих равных условиях данный кабель.

Возможной формой целевой функции признается сумма параметров одной размерности или сумма функций от этих параметров

$$v(y) = f_i(y_1) + f_j(y_j) + f_k(y_k) + \dots$$

Такие целевые функции характерны для оптимизации по экономическим критериям. Например, при минимизации годовых приведенных затрат на систему целевая функция представляет собой сумму двух внешних параметров капитальных затрат, отнесенных к сроку окупаемости системы, и эксплуатационных расходов. В свою очередь, каждый из этих внешних параметров системы представляют собой сложную функцию ее внутренних (подлежащих нахождению) параметров.

VII. Нахождение решения и его проверка. Искомый оптимальный вариант находится тем или иным математическим методом, базирующимся, как правило, на теории исследования операций. Уравнения связи решаются либо аналитически (в относительно простых задачах), либо графически или графо-аналитически, либо методами математического моделирования на ЭВМ.

Вследствие того, что при использовании подобных методов решения задач оптимизации, как правило, принимаются упрощения и допущения, возникает необходимость в проверке и уточнении как самой модели, так и полученного решения.

При решении задачи оптимального конструирования КИД авторы использовали метод решения, основанный на прямом математическом модели-

ровании конструкций кабелей ШД связи с учетом всех их возможных вариантов. В итоге был применен широко распространенный метод технико-экономического сопоставления нескольких возможных вариантов решения, которые базируются на заранее выбранных по тем или иным критериям дискретных значениях основных параметров. Так, были выбраны материалы и диаметры токопроводящих жил, материалы, конструкции и возможные толщины изоляции. Для более детальной оптимизации кабелей необходимо исследовать технико-экономические показатели в ходе непрерывного изменения одного или нескольких независимых параметров при одновременном учете всех остальных факторов.

Изолированные жилы, образующие сердечник КШД, и оболочка (в совокупности с экраном и защитными покровами) служат двумя ключевыми элементами, характеризующими конструкцию кабеля в целом, степень ее оптимальности. От конструкции изолированных жил во многом зависят электрические характеристики кабеля, его габариты, стоимость, т.е. в целом выбранная конструкция кабеля.

10.2. Метод оптимизации КШД

Рассмотрим один из наиболее распространенных методов оптимизации, который может быть применен при конструировании КШД.

Кабели ШД, конструкции которых требуется оптимизировать, предназначены для транспортных сетей и сетей абонетского доступа с заданной максимальной усилительной способностью оборудования (дальностью связи l_i). Поэтому для каждой l_i необходимо однозначно вычислить коэффициент затухания, представляющий собой внешний параметр

$$\alpha_i = \alpha/l_i.$$

Сформулируем некоторые наиболее важные требования к конструкции симметричных кабелей цифровых систем передачи. Эти требования могут быть приняты в качестве допущений при разработке математической модели оптимизации КШД.

1. В таких конструкциях целесообразно применять парную скрутку групп способом витой пары как обеспечивающую наилучшие условия взаимных влияний. Для изоляции жил удобно и целесообразно максимально использовать конструкции на основе «пористых» технологий.

2. Для придания парам более округлой формы и устранения западания пар в другие не исключается возможность введения в конструкцию кабеля

центрирующих корделей. В качестве последних могут быть использованы водоблокирующие нити, которые, наряду с выполнением своих основных функций водоблокирования, смогут выполнить и функции центрирования пар.

3. Возможная «емкость» цифровых кабелей, т.е. номинальное число пар от 1 до 100.

4. Внутри сердечника кабеля необходимая величина переходных затуханий достигается различными шагами скрутки, некратными и неравными друг другу.

5. Экраны должны изготавливаться из металлов с достаточно хорошей проводимостью, с тем чтобы обеспечить минимальные потери передачи за счет экранирования и необходимое затухание экранирования. В этом отношении достаточно хорошим материалом считается алюминиевая фольга. Наиболее подходящая конструкция экрана — цилиндрический алюмополимерный экран с продольным швом и соответствующим перекрытием. Витые экраны наименее желательны.

6. Возможные диаметры токопроводящих жил $d_0 = 0,40; 0,50; 0,64; 0,70; 0,90; 1,20$ мм.

7. Для герметизации сердечника КШД от проникновения влаги могут применяться гидрофобные заполнители разных марок или водоблокирующие элементы в виде водоблокирующих нитей разной толщины и водоблокирующих пленок.

8. Поясная изоляция может изготавливаться из различных типов пленок, в том числе и водоблокирующих как с продольным наложением, так и скрученных спиральной скруткой с определенным перекрытием. Возможна выпрессованная поясная изоляция в виде трубки из полиэтилена.

9. Для придания конструкции кабелей жесткости и защищенности от механических воздействий применяются различные защитные покровы, в том числе и броневые.

Критерии оптимальности. В качестве критерия для оптимизации КШД может быть принята *стоимость кабеля*.

Себестоимость кабеля на 80...90% определяется стоимостью основных материалов. Остальные статьи затрат: заработная плата, накладные расходы (цеховые и заводские), пропорциональные заработной плате, внепроизводственные расходы. Все эти затраты, а также планируемая рентабельность могут быть учтены некоторым стоимостным коэффициентом $k_{ст}$, который для однотипных кабелей практически можно считать одинаковым.

Таким образом, стоимость КШД определяется выражением

$$P_{каб} = k_{ст} P_{мат} \quad (10.1)$$

Стоимость основных материалов можно представить в виде суммы стоимостей отдельных элементов: токопроводящих жил $P_{ж}$, изоляции жил $P_{из}$, поясной изоляции $P_{псн}$, экрана $P_{э}$, оболочки $P_{об}$, защитных покровов $P_{з.п}$, в стоимость которых входит и стоимость брони $P_{бр}$, гидрофобного заполнителя или водоблокирующих элементов P_3 и других материалов.

Целевая функция. Учитывая практическое постоянство коэффициента $k_{ст}$, для однотипных кабелей примем в качестве целевой функции стоимость основных материалов кабеля — внешний параметр y_2 :

$$v(y) = y_2 = P_{мат} = \varphi(P_{ж}, P_{из}, P_{псн}, P_{э}, P_{об}, P_3, P_{з.п}). \quad (10.2)$$

Составим выражение для стоимости основных материалов, идущих на изготовление кабеля.

Стоимость материала данного конструктивного элемента, руб./км,

$$P = Mp = S\gamma p,$$

где M — масса конструктивного элемента, кг/км; S — площадь поперечного сечения конструктивного элемента, мм²; γ — плотность материала, т/м³ (г/см³); p — цена материала, руб/кг.

Расчет стоимости токопроводящих жил проводится по формуле

$$P_{ж} = nk_{у.общ} \left(\pi d_0^2 / 4 \right) \gamma_{ж} p_{ж}, \quad (10.3)$$

где n — число жил в кабеле; $k_{у.общ}$ — обобщенный коэффициент укрутки; $\gamma_{ж}$ — плотность материала жил, т/м³ (г/см³); $p_{ж}$ — цена материала жил, руб/кг.

Расчет стоимости сплошной изоляции токопроводящих жил можно провести по формуле

$$P_{из} = n \frac{\pi(d_1^2 - d_0^2)}{4} \gamma_{из} p_{из}. \quad (10.4)$$

Пленко-пористая изоляция токопроводящих жил (изоляция типа «skin-foam») состоит из двух концентрических слоев. Первый (наружный «skin») слой из сплошного полиэтилена, второй (внутренний «foam») — из вспененного полиэтилена. Каждый слой изготавливается из специальных полиэтиленов, имеющих разные характеристики и, соответственно, цену. Поэтому стоимость пленко-пористой изоляции может рассчитываться по следующим формулам:

для стоимости наружного («skin») слоя —

$$P_S = n \frac{\pi \left[d_1^2 - (d_1 - 2\delta_S)^2 \right]}{4} \gamma_S p_S = n\pi\delta_S (d_1 - \delta_S) \gamma_S p_S; \quad (10.5)$$

для стоимости внутреннего («foam») слоя —

$$P_f = n \frac{\pi \left[(d_0 + 2\delta_f)^2 - d_0^2 \right]}{4} (1 - f_n) \gamma_f P_f = n \pi \delta_f (d_0 + \delta_f) (1 - f_n) \gamma_f P_f; \quad (10.6)$$

для стоимости пленко-пористой («skin-foam») изоляции —

$$P_{из} = P_S + P_f, \quad (10.7)$$

где $\gamma_{из}$, γ_S , γ_f — плотности материалов изоляции сплошной, наружного и внутреннего слоев пленко-пористой изоляции соответственно, т/м³ (г/см³); $P_{из}$, P_S , P_f — цена материала изоляции сплошной, наружного и внутреннего слоев пленко-пористой изоляции соответственно, руб./кг; δ_S , δ_f — толщина наружного и внутреннего слоев пленко-пористой изоляции соответственно, мм; f_n — степень вспенивания материала изоляции в долях единицы (определяется технологическими возможностями предприятия-изготовителя).

Пленко-пористая пленочная изоляция токопроводящих жил (изоляция типа «skin-foam-skin») состоит из трех концентрических слоев. Первый (наружный «skin») слой из сплошного полиэтилена, второй (средний «foam») — из вспененного полиэтилена, третий (внутренний «skin») — из сплошного полиэтилена. Наружный и внутренний слои изоляции изготавливаются, как правило, из одинакового материала, средний слой из материала с другими характеристиками и, соответственно, ценой.

Стоимость наружного («skin») слоя определяется из выражения

$$P_{S1} = n \frac{\pi \left[d_1^2 - (d_1 - 2\delta_{S1})^2 \right]}{4} \gamma_S P_S = n \pi \delta_{S1} (d_1 - \delta_{S1}) \gamma_S P_S; \quad (10.8)$$

среднего («foam») слоя —

$$P_f = n \frac{\pi \left[(d_1 - 2\delta_{S1})^2 - (d_0 + 2\delta_{S2})^2 \right]}{4} (1 - f_n) \gamma_f P_f; \quad (10.9)$$

внутреннего («skin») слоя —

$$P_{S2} = n \frac{\pi \left[(d_0 + 2\delta_{S2})^2 - d_0^2 \right]}{4} \gamma_S P_S = n \pi \delta_{S2} (d_0 + \delta_{S2}) \gamma_S P_S. \quad (10.10)$$

пленко-пористой пленочной («skin-foam-skin») изоляции —

$$P_{из} = P_{S1} + P_f + P_{S2}, \quad (10.11)$$

где δ_{S1} , δ_{S2} , δ_f — толщина наружного, внутреннего и среднего слоев пленко-пористой пленочной изоляции соответственно, мм.

Толщина слоев полиэтилена для «пористых» конструкций изоляции токопроводящей жилы определяется технологическими возможностями предприятия-изготовителя и применяемыми материалами и имеет четко выраженную тенденцию: достижение минимальной толщины слоев сплошного полиэтилена и максимальной толщины вспененного полиэтилена при максимальной степени вспенивания $f_{п}$.

Стоимость каждого из покровов, накладываемых поверх скрученного сердечника, т.е. поясной изоляции, экрана, оболочки и так далее, можно записать в виде

$$P_{\text{ипокр}} = \pi D_i t_i \gamma_i p_i, \quad (10.12)$$

где D_i — средний диаметр соответствующего покрова, мм; t_i — толщина покрова, мм; γ_i — плотность материала покрова; p_i — цена материала покрова.

Подставляя (10.3), (10.4), (10.12) в (10.2), получаем для сплошной изоляции токопроводящей жилы:

$$\begin{aligned} P_{\text{мат}} &= \varphi(d_0, d_1) = \pi n \frac{d_0^2}{4} \gamma_{\text{ж}} p_{\text{ж}} + \pi n \frac{d_1^2 - d_0^2}{4} \gamma_{\text{из}} p_{\text{из}} + \pi \sum_{i=1}^m D_i t_i \gamma_i p_i = \\ &= \pi \left\{ n \left[\frac{d_0^2 \gamma_{\text{ж}} p_{\text{ж}} + d_1^2 \gamma_{\text{из}} p_{\text{из}} - d_0^2 \gamma_{\text{из}} p_{\text{из}}}{4} \right] + \sum_{i=1}^m (D_i t_i \gamma_i p_i) \right\}. \end{aligned} \quad (10.13)$$

Постановка задачи. Целевая функция, как видно из (10.13), в основном, является функцией двух независимых конструктивных параметров. При соблюдении заданного значения коэффициента затухания α_i она должна быть минимальна, т.е.

$$P_{\text{мат}} = \varphi(d_0, d_1) \rightarrow \min. \quad (10.14)$$

Оптимизируемые параметры. Выражение (10.13) устанавливает связь между стоимостью кабеля и его конструктивными параметрами, но не учитывает в явном виде зависимость стоимости от величины коэффициента затухания и сопротивления цепи (в неявном виде эта зависимость присутствует, так как указанные характеристики однозначно определяются конструктивными параметрами кабеля). Поэтому в первую очередь возникает необходимость в выражении параметров передачи кабеля через конструктивные характеристики. Рассмотрим эту задачу более детально.

Вследствие зависимости коэффициента затухания от частоты в общем случае необходимо рассматривать весь спектр частот уплотнения технологиями DSL. Однако задачу можно облегчить тем, что, как правило, наибольший интерес представляет величина коэффициента затухания на максималь-

ной частоте спектра, так как именно этой величиной определяется расстояние между промежуточными усилителями.

Для высоких частот коэффициент затухания цепи может быть представлен в виде суммы двух составляющих

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_G, \quad (10.15)$$

учитывающих соответственно затухание в металле и диэлектрике:

$$\alpha_R = 8,7 \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C_p}{L}}; \quad \alpha_G = 8,7 \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C_p}}, \quad (10.16)^*$$

где R — полное активное сопротивление цепи, Ом/км; C_p — рабочая емкость цепи, Ф/км; L — индуктивность цепи, Г/км; G — проводимость изоляции, МОм/км; α , α_R и α_G , дБ/км.

Область применения формул (10.15) и (10.16) определяется в зависимости от требуемой точности расчета. Как показано в [18], допускаемая при пользовании формул (7.16) погрешность не превышает 1% в случае, если $\omega L/R \geq 3,5$ и 3%, если $\omega L/R \geq 2,1$ ($\omega = 2\pi f$ — круговая частота; f — частота).

В (10.16) активное сопротивление симметричной экранированной цепи

$$R = R_0 \left[1 + F(x) + \frac{pG(x)(d_0/a)^2}{1 - H(x)(d_0/a)^2} \right] + R_s, \quad (10.17)$$

где

$$R_0 = \frac{8\rho k_{у,общ}}{\pi d_0^2} \cdot 10^3 \text{ — сопротивление цепи постоянному току.}$$

Для медных жил ($\rho = 17,24$ Ом·мм²/км)

$$R_0 = \frac{8 \cdot 17,24 \cdot 1,02}{3,14 \cdot d_0^2} \cdot 10^3 = \frac{47,3}{d_0^2} \cdot 10^3, \quad (10.18)$$

$$R_0 F(x) = \frac{47,3 \cdot F(x)}{d_0^2} \cdot 10^3 \text{ —} \quad (10.19)$$

сопротивление, возникающее за счет поверхностного эффекта.

Функция $F(x)$ табулирована. При аргументе $x \geq 10$ ее рекомендуется вычислять по формуле

* Примечание. Некоторая, присутствующая в дальнейшем повторяемость формул и выражений, объясняется стремлением авторов облегчить восприятие читаемого материала.

$$F(x) = \frac{\sqrt{2}x - 3}{4}.$$

Аргумент x для медных проводников можно рассчитать как $x = 0,0105 \cdot d_0 \sqrt{f}$.

Сопротивление близости для парной скрутки

$$R_{бл(п)} = R_0 \frac{pG(x)(d_0/2a)^2}{1 - H(x)(d_0/2a)^2} \cdot 10^3, \quad (10.20)$$

где a — половина расстояния между осями жил цепи;

$$2a = \xi d_1. \quad (10.20a)$$

Для парной скрутки $\xi = 1$ и $p = 1$, для четверочной скрутки $\xi = 1,41$ и $p = 5$.

Функция $G(x)$ и $H(x)$ также табулированы. При $x \geq 10$ для их вычисления используются формулы

$$G(x) \approx \frac{\sqrt{2}x - 1}{8}; \quad H(x) \approx 0,75.$$

Сопротивление близости для четверочной скрутки

$$R_{бл,ч} = \frac{95,2 \left(\frac{1}{\xi}\right)^2 G(x)}{d_0^2 \left(1 - H(x) \left(\frac{1}{1,41\xi}\right)^2\right)} \cdot 10^3. \quad (10.21)$$

Сопротивление потерь в алюмополимерном экране для высокочастотной зоны, в пределах которой рассматриваются конструкции КШД

$$\begin{aligned} R_p &= 8Z_B \frac{1}{2\pi r_3} \frac{\text{sh}\sqrt{2}|k|t + \sin\sqrt{2}|k|t}{\text{ch}\sqrt{2}|k|t - \cos\sqrt{2}|k|t} = \\ &= \frac{0,635}{d_0\xi} \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} \frac{\text{sh}0,23t\sqrt{f} + \sin 0,23t\sqrt{f}}{\text{ch}0,23t\sqrt{f} + \cos 0,23t\sqrt{f}}. \end{aligned} \quad (10.22)$$

Сопротивления, обусловленные потерями в экране R_p эффектом близости $R_{бл}$, зависят от конструкции кабеля, поэтому для каждого варианта конструкции необходимо найти соответствующее аналитическое выражение. Теоретический расчет потерь в экране и металлической оболочке кабеля, а также

в соседних жилах весьма затруднителен и относительно неточен. Поэтому эти выражения реализуются программным способом в разработанной авторами аналитической модели, позволяющей рассчитать любую конструкцию кабелей связи с учетом имеющихся экспериментальных данных.

В [19] приводится выражение для исчисления полного активного сопротивления высокочастотной симметричной медной кабельной цепи в спектре частот от нескольких десятков килогерц до нескольких мегагерц:

$$R = k_y \left[\frac{0,174}{d_0} + \frac{12}{d_0^2 \sqrt{f}} + h \frac{0,087}{d_0 (\xi \cdot d_1 / d_0)^2} + 2,23 \cdot 10^{-3} (R_{\text{ж}} + R_s) \right] \sqrt{f}, \quad (10.22 \text{ а})$$

где $R_{\text{ж}}$ и R_s — экспериментальные данные потерь в экране и в соседних жилах. При достаточно высоких частотах вторым слагаемым в квадратных скобках в формуле можно пренебречь.

Индуктивность цепи L для кабелей с медными жилами и алюмополимерным экраном:

парная скрутка ($a = d_1$) —

$$\begin{aligned} L_{\text{п}} &= k_y \left[4 \ln \frac{2a - d_0}{d_0} + \mu_r Q(x) \right] 10^{-4} = k_y \left[4 \ln \frac{2d_1 - d_0}{d_0} + \mu_r Q(x) \right] 10^{-4} = \\ &= 1,02 \left[4 \ln (2\xi - 1) + Q(x) \right], \end{aligned} \quad (10.23)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость материала жил (для немагнитных медных жил $\mu_r = 1$);

четверочная скрутка ($a = 1,41d_1$) —

$$\begin{aligned} L_{\text{ч}} &= k_y \left[4 \ln \frac{2a - d_0}{d_0} + \mu_r Q(x) \right] 10^{-4} = k_y \left[4 \ln \frac{2 \cdot 1,41d_1 - d_0}{d_0} + \mu_r Q(x) \right] 10^{-4} = \\ &= 1,02 \left[4 \ln (2,82\xi - 1) + Q(x) \right]. \end{aligned} \quad (7.24)$$

Электрическая (рабочая) емкость:

парная скрутка —

$$C = k_y \frac{\varepsilon_{\text{р.эк}}}{36 \ln \left(\frac{2a\psi}{d_0} \right)} = k_y \frac{\varepsilon_{\text{р.эк}}}{36 \ln \left(\frac{2d_1 \cdot 0,75}{d_0} \right)} = 0,028 \frac{\varepsilon_{\text{р.эк}}}{\ln(1,5\xi)}; \quad (10.25)$$

четверочная скрутка —

$$C = k_{\text{у.общ}} \frac{\varepsilon_{\text{р.эк}}}{36 \ln \left(\frac{2a\psi}{d_0} \right)} = k_{\text{у.общ}} \frac{\varepsilon_{\text{р.эк}}}{36 \ln \left(\frac{2 \cdot 1,41 \cdot d_1 \cdot 0,65}{d_0} \right)} = 0,028 \frac{\varepsilon_{\text{р.эк}}}{\ln(1,83\xi)}. \quad (10.26)$$

Проводимость изоляции цепи, обусловленная диэлектрическими потерями при переменном токе

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta_{\text{жк}}. \tag{10.27}$$

В [19] приведено выражение для расчета коэффициента затухания симметричных высокочастотных кабельных цепей с медными жилами в диапазоне частот до 10 МГц:

$$\alpha = \frac{9,35 \cdot 10^{-6} k_y \sqrt{\epsilon_r} f}{\ln |2\xi \cdot d_1 \psi / d_0|} \left\{ \frac{78}{d_0} \left[1 + \frac{h}{2(\xi \cdot d_1 / d_0)^2} \right] + (R_{\text{ж}} + R_{\text{с}}) \right\}. \tag{10.28}$$

Волновое сопротивление

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{L/C}. \tag{10.28 а}$$

10.3. Математическая модель расчета конструкции КШД

Одной из особенностей предлагаемого метода оптимизации является установление единой взаимной зависимости между стоимостными, электрическими и конструктивными параметрами КШД. С этой целью авторами была разработана аналитическая модель для расчета любых возможных конструкций кабелей связи, позволяющая учесть их особенности и снять большую часть ограничений и допущений, присущих моделям оптимизации конструкций кабелей, разрабатываемых ранее [19]. Блок-схема модели представлена на рис. 10.1. Алгоритм и программа модели разработана на языке Visual Basic в рамках программного продукта Microsoft Excel.

В блоке 1 происходит ввод исходных данных для расчета конструкции кабеля (рис. 10.2).

Исходная информация вводится при открытии окон в соответствующих списках панели ввода. По окончании формирования варианта конструкции кабеля нажимается кнопка «Расчеты».

В блоке 2 рассчитываются электрические характеристики, геометрические размеры, весовые и стоимостные параметры варианта конструкции кабеля.

В блоке 3 сосредоточена справочная информация для расчетов, которая программно используется в блоке 2.

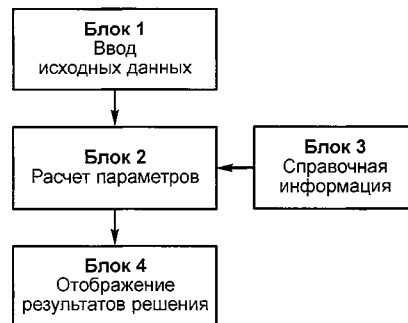


Рис. 10.1. Структурная схема аналитической модели расчета конструкции цифровых кабелей

В блоке 4 отображаются результаты расчетов.

Последовательность вычислительных действий:

а) выбирается возможный вариант конструкции цифрового кабеля, используя панель ввода в блоке 1;

б) варьируется в заданных пределах отношение $\xi = d_1/d_0$;

в) для каждого из фиксированных значений числа пар n и параметров кабеля рассчитывается значение целевой функции $P_{\text{мат}i} = f(\xi_i)$ при условии, что рассчитанная величина коэффициента затухания α_i не превысит заданного значения;

г) по построенным графическим или табличным зависимостям определяется $\xi_{\text{опт.л}}$, соответствующее $P_{\text{мат}} = \min$ для выбранного варианта конструкции цифрового кабеля и числа пар;

д) из совокупности значений $\xi_{\text{опт.л}}$ выбирается одно общее $\xi_{\text{опт.общ}}$, наилучшим образом удовлетворяющее всему диапазону числа пар в данном варианте конструкции цифрового кабеля, так как конструкция изолированных жил должна быть одинакова в кабелях одной серии независимо от числа пар.

Ввод исходной информации

Тип кабеля	Скрутка групп	К-во пар	Диаметр ТПЖ	Тип изоляции
Цифровой с в/б элем.	Четверочная	4	0,9	Пленко-пористая-пленочная
Толщина изоляции	Степень вспен. %	Скрутка пары	Скрутка ЭП	
0,3	60	Однонапр. hсогл = до 30 мм	h = до 600 мм	
Скрутка сердечника	Поясная изоляция	Экран		
h = до 1000 мм	Экструдированная	Алюмополимерный d=0,1 мм		
Оболочка	Защитные покрытия	Броня		
П/э шланг	Тип ББШп	1 стальная лента h = 0,3 мм		
Номер столбца в таблице	Кабель цифровой с водоблокирующими элементами с пленко-пористой пленочной изоляцией			
1				
РАСЧЕТЫ				
Цифровой с заполнит.			4 × 2 × 0,9	

Рис. 10.2. Внешний вид панели для ввода данных в модель

Информация, полученная при решении задач моделирования конструкции кабеля и предлагаемая для рассмотрения и исследований, может быть представлена в следующем виде:

– геометрические размеры рассматриваемой конструкции кабеля (табл. 10.1);

Таблица 10.1. Сравнительная оценка кабелей

№ п/п	Параметр	1	2	3	4
		Тип 3 4x2x0,9	Тип 3 4x2x0,9	Тип 3 4x2x0,9	Тип 3 4x2x0,9
<i>Геометрические размеры</i>					
1	Количество пар	4	4	4	4
2	Диаметр ТПЖ, мм	0,9	0,9	0,9	0,9
3	Толщина изоляции, мм	0,3	0,36	0,4	0,5
4	Пленко-пористая изоляция:				
	толщина наружного слоя	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	толщина вспененного слоя	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	% вспенивания	0,00	0,6	0,6	0,6
5	Пленко-пористая пленочная изоляция:				
	толщина наружного слоя	0,0360	0,0432	0,0480	0,0600
	толщина вспененного слоя	0,2540	0,3068	0,3420	0,4300
	толщина внутреннего слоя	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100
	% вспенивания	0,60	0,6	0,6	0,6
6	Диаметр изолированной жилы, мм	1,5	1,62	1,7	1,9
7	Средний шаг скрутки группы, мм	30	30	30	30
8	Диаметр сердечника кабеля, мм	5,6	6,0	6,3	7,0
9	Средний шаг скрутки элементарного пучка, мм	0	0	0	0
10	Средний шаг скрутки сердечника, мм	100	100	100	100
11	Ширина поясной изоляции, мм	0	0	0	0
12	Ширина экрана, мм	28	29	31	33
13	Толщина покровов, мм	0	0	0	0
14	Толщина брони, мм	0,3	0,3	0,3	0,3
15	Диаметр кабеля под оболочкой, мм	8,1	8,5	8,8	9,6
16	Толщина оболочки, мм	1,7	1,7	1,7	1,7
17	Диаметр кабеля, мм	11,7	12,2	12,5	13,3
18	Толщина защитного шланга для ББШп, мм	1,5	1,5	1,5	1,5
19	Наружный диаметр кабеля типа ББШп, мм	15,59396	16,07456	16,39496	17,19596

- весовая функция кабелей и стоимостные параметры рассматриваемых конструкций кабелей (табл. 10.2);
- электрические параметры кабелей (табл. 10.3);
- диаграммы сравнительных характеристик кабелей на частоте 160 кГц (рис. 10.3, а) и на частоте 1024 кГц (рис. 10.3, б).

Таблица 10.2. Весовая функция и стоимостные параметры

1	Медь	Вес, кг Стоимость, у.е.	46,1 67,12	46,1 67,12	46,1 67,12	46,1 67,12
2	Медно-оловянная жила	Вес, кг Стоимость, у.е.	1,78 9,30	1,78 9,30	1,78 9,30	1,78 9,30
3	Лента алумополи- этиленовая	Вес, кг Стоимость, у.е.	8,34 31,60	8,83 33,45	9,16 34,69	9,98 37,79
4	Полиэтиленовый «skin»-слой для пленко- пористой пленочной изоляции	Вес, кг Стоимость, у.е.	1,5 1,23	1,8 1,53	2,1 1,76	2,8 2,37
5	Полиэтиленовые пены для пленко-пористой пленочной изоляции	Вес, кг Стоимость, у.е.	2,87 3,54	3,62 4,46	4,15 5,12	5,58 6,88
6	Полиэтилен для оболочки	Вес, кг Стоимость, у.е.	49,1 44,94	51,4 47,06	53,0 48,48	56,8 52,01
7	Защитные покровы	Вес, кг Стоимость, у.е.	183,5 183,50	190,9 190,90	195,8 195,83	208,2 208,16
8	Броня	Вес, кг Стоимость, у.е.	128,5 141,30	133,6 146,99	137,1 150,79	145,7 160,29
9	Краситель	Вес, кг Стоимость, у.е.	0,01003 0,06	0,01309 0,07	0,01536 0,09	0,02180 0,12
10	Гидрофоб	Вес, кг Стоимость, у.е.	3,9 4,34	3,9 4,34	3,9 4,34	3,9 4,34
	<i>Итого</i>	Вес, кг Стоимость, у.е.	425,6 486,9	442,1 505,2	453,2 517,5	481,0 548,4

Таблица 10.3. Электрические параметры

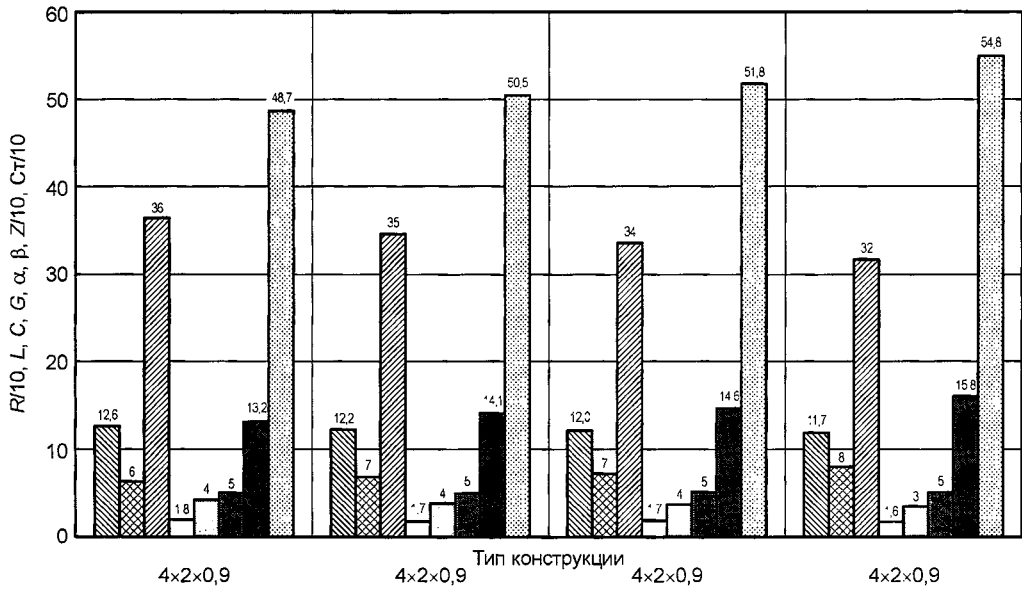
Первичные

№ п/п	Параметр	Значение				
1	R, Ом/км	1 кГц	58,7	59,3	59,8	61,0
		10 кГц	59,4	60,0	60,4	61,5
		40 кГц	70,6	70,1	70,0	70,0
		80 кГц	91,1	89,2	88,3	86,9
		160 кГц	125,7	122,1	120,3	117,5
		320 кГц	173,5	167,8	165,0	160,4
		500 кГц	217,3	209,7	205,8	199,4
		1000 кГц	305,7	294,0	288,1	278,1
		2000 кГц	428,7	411,4	402,6	387,7
		4000 кГц	599,3	574,3	561,7	540,1
2	L, Г/(км·10⁻⁴)	1 кГц	6,7	7,1	7,5	8,2
		10 кГц	6,7	7,1	7,5	8,2
		40 кГц	6,6	7,1	7,4	8,2
		80 кГц	6,5	7,0	7,3	8,1
		160 кГц	6,4	6,8	7,2	7,9
		320 кГц	6,2	6,6	6,9	7,7
		500 кГц	6,0	6,5	6,8	7,6
		1000 кГц	5,9	6,4	6,7	7,4
		2000 кГц	5,8	6,3	6,6	7,3
		4000 кГц	5,8	6,2	6,5	7,3
3	G, См/(км·10⁻⁶)	1 кГц	0,0	0,0	0,0	0,0
		10 кГц	0,4	0,4	0,4	0,3
		40 кГц	2,7	2,5	2,4	2,3
		80 кГц	7,7	7,3	7,1	6,7
		160 кГц	18,3	17,4	16,9	15,9
		320 кГц	51,3	48,7	47,3	44,5
		500 кГц	91,5	87,0	84,4	79,5
		1000 кГц	274,6	260,9	253,3	238,6
		2000 кГц	640,7	608,7	591,1	556,7
		4000 кГц	1281,5	1217,3	1182,1	1113,3
4	C, нФ/км	36,4	34,6	33,6	31,7	

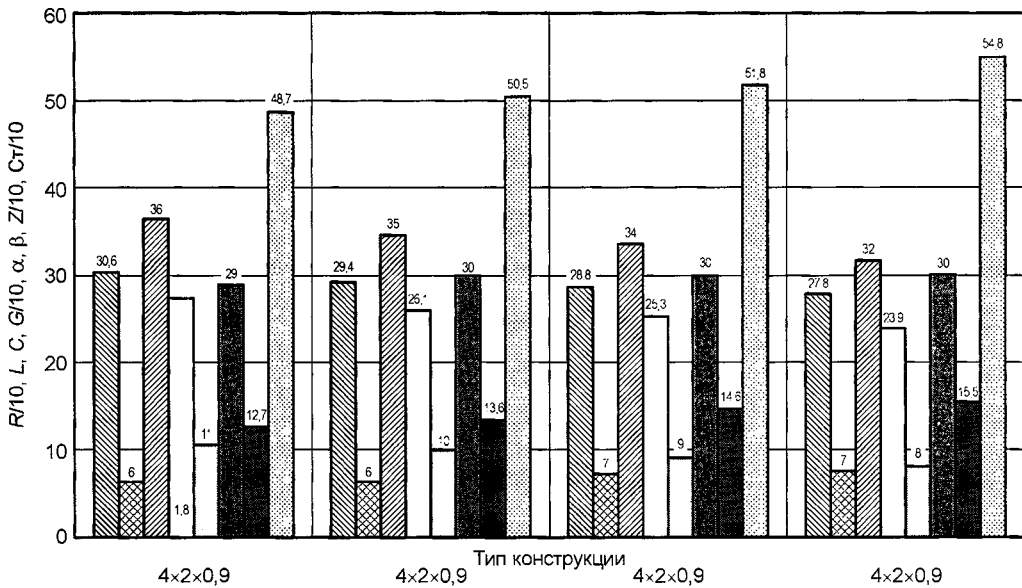
Вторичные

Продолжение таблицы 10.3

№ п/п	Параметр	Значение				
1	α , дБ/км	1 кГц	0,7	0,7	0,7	0,6
		10 кГц	1,6	1,6	1,5	1,5
		40 кГц	2,2	2,1	2,0	1,9
		80 кГц	2,9	2,7	2,6	2,4
		160 кГц	4,1	3,8	3,6	3,2
		320 кГц	5,8	5,3	5,0	4,5
		500 кГц	7,4	6,7	6,3	5,7
		1000 кГц	10,6	9,6	9,0	8,1
		2000 кГц	15,1	13,6	12,9	11,4
4000 кГц	21,4	19,3	18,2	16,2		
2	β , рад/км	1 кГц	0,1	0,1	0,1	0,1
		10 кГц	0,4	0,4	0,4	0,4
		40 кГц	1,3	1,3	1,3	1,3
		80 кГц	2,5	2,5	2,5	2,6
		160 кГц	4,9	4,9	4,9	5,0
		320 кГц	9,5	9,7	9,7	9,9
		500 кГц	14,8	14,9	15,1	15,4
		1000 кГц	29,2	29,6	29,8	30,5
		2000 кГц	57,9	58,7	59,2	60,5
4000 кГц	115,1	116,7	117,8	120,5		
3	Z_B , Ом	1 кГц	135,2	143,7	149,0	161,0
		10 кГц	135,2	143,7	148,9	161,0
		40 кГц	134,9	143,4	148,6	160,7
		80 кГц	134,0	142,5	147,7	159,8
		160 кГц	132,1	140,6	145,9	157,9
		320 кГц	130,0	138,5	143,7	155,8
		500 кГц	128,8	137,2	142,5	154,6
		1000 кГц	127,4	135,9	141,1	153,2
		2000 кГц	126,4	134,9	140,2	152,2
4000 кГц	125,7	134,2	139,5	151,5		
4	φ_z , рад	1 кГц	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
		10 кГц	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4
		40 кГц	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
		80 кГц	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
		160 кГц	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
		320 кГц	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
		500 кГц	-0,1	-0,1	0,0	0,0
		1000 кГц	0,0	0,0	0,0	0,0
		2000 кГц	0,0	0,0	0,0	0,0
4000 кГц	0,0	0,0	0,0	0,0		



a



b

Рис. 10.3. Диаграмма сравнительных характеристик кабелей:
 а — $f = 160$ кГц; б — 1024 кГц; последовательность столбцов: R, L, C, G, α , β , Z, стоимость



Необходимо отметить, что модель конструирования кабелей может обеспечивать определение весовых коэффициентов стоимости материалов в суммарной стоимости кабелей

$$K_M = C_M / C_K,$$

где K_M — весовой коэффициент стоимости (коэффициент «важности») материала конструкции кабеля; C_M — стоимость материала конструкции; C_K — суммарная стоимость кабеля.

Коэффициенты важности могут позволить конструктору кабелей при всех остальных равных условиях определить наиболее выгодную конструкцию с точки зрения использования дорогих и дефицитных материалов и технологий их переработки и применения.

При разработке модели использовались расчетные формулы, приведенные далее в 10.4–10.8.

10.4. Расчет токопроводящих жил КШД

Материалы для токопроводящей жилы

Из всех материалов (кроме благородных) медь обладает наибольшей электропроводностью. Широкое применение меди в кабельной технике вызвано способностью ее к прокатке и волочению, что обеспечивает получение больших длин проволоки, практически любых размеров.

Медная проволока для кабельной промышленности выпускается из меди марок М10 или М1, содержащих наименьшее количество примесей. Для производства жил цифровых кабелей применяется медная мягкая (отожженная) круглая проволока марки ММ.

Основные характеристики медной проволоки, применяемой для производства цифровых кабелей, представлены в табл. 10.4.

Таблица 10.4. Характеристики медной проволоки, применяемой для производства цифровых кабелей

Удельный вес, г/см ³	Марка проволоки	Диапазон диаметров, мм	Удельное электрическое сопротивление, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Предел прочности при растяжении, кг/мм ²	Относительное удлинение при разрыве, %
8,9	ММ	0,03...10,0	0,0177...0,0180	36...39	1...2

Для предохранения от коррозии на медную проволоку может наноситься защитное покрытие (лужение оловом).

Расчет массы токопроводящих жил

Формула для расчета электрического сопротивления однопроволочной токопроводящей жилы из меди имеет вид

$$R_{\text{ж}} = \rho \frac{1}{S} = \rho \frac{4}{\pi d_0^2}, \quad (10.29)$$

где ρ — удельное сопротивление меди, Ом·мм²/м; $S = \frac{\pi d_0^2}{4}$ — площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, мм²; d_0 — диаметр токопроводящей жилы, мм.

Рассчитывать приходится преимущественно параметры не отдельно взятой жилы, а жилы, входящей в цифровой кабель, и относить значения этих параметров к единице длины кабеля. В общем случае длина жилы $l_{\text{ж}}$ цифрового кабеля длиной $l_{\text{к}}$:

$$l_{\text{ж}} = k_{\text{у.общ}} l_{\text{к}}, \quad (10.30)$$

где $k_{\text{у.общ}}$ — обобщенный коэффициент укрутки.

С учетом (10.29)

$$R_{\text{ж}} = \rho \frac{4k_{\text{у.общ}}}{\pi d_0^2}. \quad (10.31)$$

Можно решить обратную задачу — нахождение по заданному электрическому сопротивлению жилы ее диаметра, мм:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4k_{\text{у.общ}}\rho}{\pi R_{\text{ж}}}}. \quad (10.32)$$

В формулы для расчета коэффициента затухания α входит значение электрического сопротивления не одной, а обеих жил (шлейфа) пары, Ом/км. С учетом этого

$$R_{\text{шл}} = 2R_{\text{ж}} = \rho \frac{8k_{\text{у.общ}}}{\pi d_0^2}. \quad (10.33)$$

Масса медной изолированной токопроводящей жилы на единицу длины, кг/км,

$$M_{\text{ж}} = \gamma \frac{\pi d_0^2}{4}. \quad (10.34)$$

С учетом укрутки

$$M_{\text{ж}} = \gamma \frac{\pi d_0^2}{4} k_{\text{у.общ}}. \quad (10.35)$$

Суммарная масса всех токопроводящих жил в цифровом кабеле

$$\sum_{i=1}^n M_{\text{ж}} = n\gamma \frac{\pi d_0^2}{4} k_{\text{у.общ}}, \quad (10.36)$$

где n — число жил в кабеле.

Если выражать плотность в килограммах на метр кубический, то в формулы расчета масс следует вводить множитель 10^3 .

10.5. Особенности конструирования изоляции токопроводящих жил герметизированных КШД

Технические предпосылки герметизации сердечника

Физическая модель, описывающая кабельные линии сети абонентского доступа, к которым относятся и КШД, показывает, что использование цепей для уплотнения оборудованием xDSL возможно только при условии стабильных электрических характеристик, обеспечивающих длительную передачу информации без ошибок. А это возможно только при обеспечении влагозащиты кабельных линий [14].

Принципиальным вариантом защиты от влаги кабелей с пластмассовой изоляцией токопроводящих жил и оболочкой был найден в 1963–1964 гг., когда английский инженер Г.А. Додд предложил заполнять все свободное пространство между изолированными жилами в кабеле (так называемый свободный объем, составляющий примерно 30–40% общего объема сердечника) вязким желеобразным гидрофобным компаундом. Таким образом, классический для кабелей связи «полувоздушный» сердечник превратился в полностью заполненный диэлектриком (естественно с учетом токопроводящих жил). Благодаря этому даже при возникновении отверстия в оболочке кабеля или в муфте влага из окружающей среды не может проникнуть внутрь кабеля и распространяться вдоль него.

Для заполнения межжильного пространства (сердечника) цифровых кабелей применяются гидрофобные заполнители производства различных зарубежных и отечественных фирм. Общие требования, которые предъявляются при этом к гидрофобным заполнителям, представлены в табл. 10.5. В качестве гидрофобных заполнителей наибольшее распространение получили заполнители на основе смеси микрокристаллических мягких нефтяных парафинов и масел, выделенных из нелетучих фракций при перегонке нефти.

Таблица 10.5. Технические требования к гидрофобным заполнителям

Наименование показателей	Норма
Вязкость кинематическая при 100°С	20...40
Температура каплепадения, °С, не ниже	60
Плотность при 20°С, г/см ³	0,860...0,880
Пенетрация при 20°С	80...120
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	220
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20°С, Ом·см, не ниже	1·10 ¹³
Диэлектрическая проницаемость при 20°С, на частоте 1,0 кГц, не выше	2,4
Кислотная стабильность, % выделившегося масла, не более	5,0
Усадка, % объема, не более	6

Специфика конструирования герметизированных кабелей заключается в том, что помимо определения толщин изоляции, удовлетворяющих заданным электрическим параметрам, необходимо учитывать фактор совместимости материалов изоляции и гидрофобного заполнителя. Изоляция из материалов полиолефинового ряда поглощает герметик на основе нефтяного желе и набухает, что может привести к нестабильности конструктивных и ухудшению механических параметров изоляции, к ее старению.

В настоящее время все более широкое распространение получает разработка конструкций «влагостойких» кабелей, основанная на применении «сухих» материалов для водоблокирования [7].

Суть идеи заключается в следующем.

Внутри сердечника кабеля при его изготовлении между элементами конструкции размещаются специальные водоблокирующие элементы в виде жгутов, лент и нитей, покрытых специальным водонабухающим составом. Эти элементы (производства, например, фирмы *FREUDENBERG*) были разработаны специально для защиты кабельной конструкции от проникновения влаги по всей длине. При попадании влаги, например в случае повреждения оболочки кабеля, набухающий материал реагирует сразу же, уплотняет поврежденные участки и препятствует попаданию воды внутрь сердечника кабеля. Таким образом, благодаря сведению к минимуму размеров поврежденного участка кабеля снижаются затраты на его ремонт. Электрические характеристики кабеля при этом практически остаются неизменными.

Влагонабухающие жгуты и ленты, изготовленные из влагонабухающих нетканых материалов, характеризуются:

- большим объемом набухания за минимальный срок;
- высокой термической стойкостью;
- отсутствием корродирующих материалов;
- высокой стойкостью старения и разложения;
- отличными механическими качествами и легкостью при обработке.

Выбор типа и расчет изоляции

Особенность конструирования изоляции герметизированных КШД по сравнению с обычными обусловлена тем, что свободный объем сердечника вместо воздуха с $\epsilon_{r\epsilon} = 1$ заполняется диэлектриком с $\epsilon_{r\epsilon} \approx 2,3$, вследствие чего неизбежно увеличение эквивалентной диэлектрической проницаемости. Конструировать герметизированные кабели можно по одному из следующих трех вариантов:

- 1) сохраняя одинаковыми тип изоляции и конструктивные размеры заполненных и незаполненных кабелей;
- 2) обеспечивая неизменными электрические параметры, стандартизованные для незаполненных кабелей;
- 3) выдерживая, по возможности, неизменными электрические и конструктивные параметры, принятые для незаполненных кабелей.

Первый вариант удобен тем, что не требует изменять технологию изолирования жил, а также параметры процессов скрутки сердечника, наложения экрана, оболочки и защитных покровов при переходе от изготовления обычных кабелей к герметизированным. Унифицированными остаются также размеры технологического инструмента при производстве кабелей, а также размеры муфт и прочих монтажных деталей.

Но при этом пропорционально возрастанию эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции увеличивается рабочая емкость цепей примерно на 15%. В обычных кабелях со сплошной полиэтиленовой изоляцией нормировано значение $C = (45 \pm 5)$ нФ/км, а в герметизированных — $C = (50 \pm 5)$ нФ/км.

Увеличение рабочей емкости является недостатком рассматриваемого способа конструирования герметизированных кабелей. Вместе с тем ввиду того, что протяженность линий из этого типа кабелей сравнительно невелика, вызванный указанным повышением емкости C незначительный (6...10%) прирост коэффициента затухания весьма мало (1...2%) сказывается на собственном затухании всей линии.

Второй вариант может быть обеспечен, как видно из формул расчета рабочей емкости, при сохранении неизменного типа изоляции увеличением ее толщины. Определить эту новую толщину можно, используя для определения емкости (9.39)

$$C = \text{const} = \frac{\epsilon_3 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2a_{\text{шт}}}{d}} \psi,$$

где ϵ_3 — эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции ТПЖ; a — расстояние между центрами ТПЖ; d — диаметр ТПЖ.

Как известно, одним из способов уменьшения диэлектрической постоянной изоляции жилы является «вспенивание» материала изоляции жилы. Вспенивание изоляции приводит к снижению величины диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь и, как следствие, к увеличению длины линии передачи без введения дополнительных усилителей, большому количеству передаваемых данных при использовании более высоких частот и большей полосе пропускания, а также к уменьшению диаметра жилы. Применение «пористых» технологий позволяет при всех остальных равных условиях существенно снизить себестоимость кабелей за счет снижения материалоемкости конструкции.

В настоящее время в технологии производства изолированной жилы используются два метода «вспенивания»: химическое и физическое (технология *EXTRUCCELL*).

При химическом вспенивании в качестве изоляции жилы используется полимер со специальными добавками (обычно азодикарбонамид). Эта добавка вступает в реакцию с полимером, образуя субпродукты при температуре экструзии. При этом степень вспенивания управляется температурой экструзии. При химическом вспенивании можно достичь степени вспенивания до 50%.

К недостаткам этого метода следует отнести трудности при контроле стабильности вспенивания. Для их преодоления необходимо иметь при таком производстве высокоскоростные экструдеры с системой автоматического слежения за степенью вспенивания изолирующего полимера (система «*Dual Loop*»).

В качестве конструкции изоляции жилы при химическом вспенивании используется пленко-пористая двухслойная конструкция, где в качестве внешнего слоя, обеспечивающего защиту изоляции от вредного воздействия гидрофобного заполнителя и механическую прочность изоляции, применяется обычный полиэтилен, а внутреннего — вспенивающийся полиэтилен.

лен. При этом толщина внешнего слоя (пленки) может составлять 25–30% общей толщины изоляции токопроводящей жилы, а степень вспенивания при отлаженной технологии производства — 40–45%. Технология химического вспенивания предусмотрена ГОСТ Р 51311–99 в конструкции кабелей типа ТПпЗП.

При физическом вспенивании в качестве материала для изоляции жилы применяется обычный полиэтилен, смешанный с реагентом в процессе экструзии для достижения однородности размеров и распределения пузырьков реагента по всему объему полиэтилена. В качестве вспенивающего реагента используется азот (фреон, CO_2), который вводится в центр экструзионного цилиндра. Степень вспенивания при этом может достичь до 80%. Процесс идет стабильно. Он не чувствителен к колебаниям температуры, позволяет уменьшить технологические отходы за счет уменьшения времени стабилизации при запуске. Степень вспенивания управляется количеством вводимого газа и легко контролируется.

В качестве конструкции изоляции жилы при физическом вспенивании используется пленко-пористая пленочная трехслойная конструкция, где в качестве внешнего и внутреннего слоев, обеспечивающих защиту от вредного воздействия заполнителя (влаги) и механическую прочность изоляции, применяется обычный полиэтилен, а промежуточного — обычный, но вспененный, полиэтилен.

Трехслойная конструкция изоляции жилы при физическом вспенивании имеет ряд преимуществ по сравнению с двухслойной при химическом вспенивании:

- можно существенно снизить величину диэлектрической проницаемости изоляции токопроводящей жилы за счет увеличения слоя вспененного полиэтилена и, как следствие, улучшить показатели первичных и вторичных электрических параметров кабеля;
- уменьшается количество пробоев за счет использования «чистого» полиэтилена для изоляции токопроводящей жилы без химических добавок;
- улучшается адгезия между токопроводящей жилой и изоляцией при наличии в изоляции слоя сплошного полиэтилена, примыкающего к токопроводящей жиле;
- исключается проникновение влаги между проводником и изоляцией;
- появляется возможность увеличения степени вспенивания и уменьшения толщины изоляции и объема используемых материалов; в результате уменьшаются геометрические размеры и объем используемых материалов (для оболочки и других элементов кабеля) до 30%;

- используются материалы менее чувствительные к трению и колебаниям температуры, что позволяет повысить скорость экструзии (до 10%);
- высокая стабильность процесса физического вспенивания обеспечивает лучшие показатели емкости и емкостной асимметрии в кабелях и, как следствие, снижение коэффициента затухания, что особенно важно для кабелей передачи данных;
- лучшая механическая прочность (стойкость к растяжению, продавливанию и разрыву) благодаря использованию полиэтиленов высокой плотности.

Для реализации технологии *EXTRUCELL* (физического вспенивания) используются современные высокоскоростные экструдеры, обеспечивающие наложение трехслойной изоляции. Толщина наружного слоя сплошного полиэтилена может составить до 0,1 мм (в зависимости от общей толщины изоляции и технологических возможностей предприятия), а толщина внутреннего слоя сплошного полиэтилена — 0,01...0,015 мм. Степень вспенивания при этом может достигать 70% и более.

Наряду с неоспоримыми преимуществами изоляции токопроводящей жилы на основе «пористых» технологий следует отметить и некоторые проблемы, связанные с ее применением.

1. Изоляция жил на основе «пористых» технологий, особенно полученная методом «физического» вспенивания, значительно более чувствительна к качеству гидрофобного заполнителя по параметру совместимости с полиэтиленами изоляции токопроводящих жил. Это объясняется сравнительно малой толщиной изолирующего (наружного) слоя изоляции. В связи с этим при выборе гидрофобного заполнителя следует обратить особое внимание на его качество по этому параметру, в том числе и в плане электрической прочности изоляции жил в процессе старения.

2. При выборе схемы скрутки групп, элементарных и главных пучков и сердечника кабеля в целом необходимо учитывать несколько меньшую механическую прочность изоляции жил на основе «пористых» технологий по сравнению с изоляцией жил со сплошным слоем полиэтилена.

На рис. 10.4 показаны варианты пластмассовой изоляции герметизированных кабелей связи.

При конструировании герметизированных кабелей особое внимание должно быть уделено проблеме взаимодействия материалов изоляции и заполнителя. Следует предусмотреть меры по максимально возможному ограничению этого взаимодействия. Особую роль играет алюмополиэтиленовый экран для герметизированных кабелей. Если в «сухих» кабелях алюмополиэтиленовый экран обеспечивает лучшую, чем просто пластмассовая, защиту

от проникновения влаги внутрь кабеля, то в герметизированных кабелях он выполняет и иную функцию — предотвращает доступ заполнителя к оболочке, его взаимодействие с ней, сохраняя свойства последней.

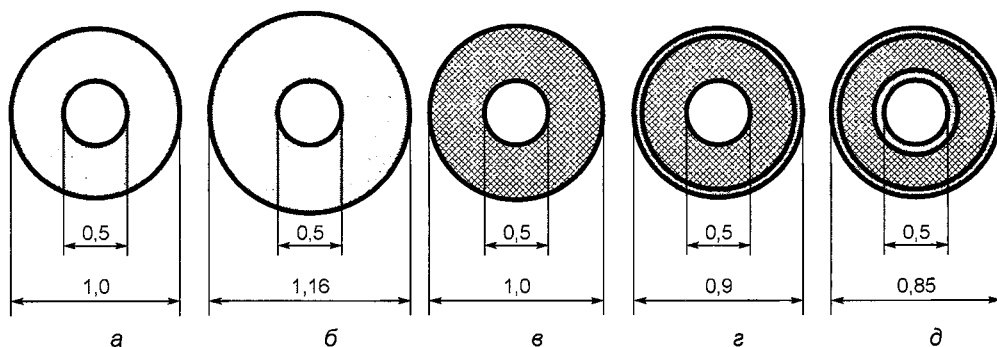


Рис. 10.4. Пять возможных вариантов пластмассовой изоляции герметизированных кабелей:

a — сплошная стандартной толщины; *б* — сплошная утолщенная;
в — пористая; *г* — пленко-пористая; *д* — пленко-пористая пленочная

По совокупности всех факторов, включая и технологию производства, можно считать наиболее перспективными для цифровых кабелей пористую, пленко-пористую и пленко-пористую пленочную изоляцию.

Отметим, что применение водоблокирующих элементов в конструкциях цифровых кабелей позволит избежать решения проблем, связанных с вредным воздействием гидрофобных заполнителей. Есть основания полагать, что именно «пористые технологии» при производстве изолированных жил совместно с водоблокирующими элементами для герметизации сердечника кабеля найдут первоочередное применение в конструкциях КШД.

10.6. Особенности конструирования сердечников КШД

Особенности конструкции сердечника

Сердечники кабелей широкополостного доступа (до 100 пар) целесообразно формировать методом пучковой скрутки. Пучковая скрутка — это двух- и трехступенчатая система:

первая ступень — скрутка изолированных групп в группы (парная или четверочная «звездная» скрутка);

вторая ступень — скрутка из групп элементарных пучков;

третья ступень — сердечники малопарных КШД.

Главная характерная особенность сердечников пучковой скрутки состоит в том, что они скручены, как правило, из однотипных пучков, хотя для КШД сердечник кабеля может быть образован различными комбинациями разнотипных пучков.

Из групп скручиваются элементарные пучки (сердечники) из 10 пар или 5 четверок. В зависимости от емкости кабеля возможны и другие варианты скрутки элементарного пучка (сердечника). Элементарный пучок 10×2 формируется по схеме (2 + 8)×2, а пучок 5×4 скручивается из пяти четверок. Сердечники кабелей образуются по следующим схемам:

$$\begin{aligned} 20 \times 2 &= 2 \times (10 \times 2); 2 \times (5 \times 4); \\ 30 \times 2 &= 3 \times (10 \times 2); 3 \times (5 \times 4); \\ 50 \times 2 &= 5 \times (10 \times 2); 5 \times (5 \times 4); \\ 100 \times 2 &= (3 + 7) \times (10 \times 2); (3 + 7) \times (5 \times 4). \end{aligned}$$

Из элементарных пучков скручивается сердечник малопарного КШД.

Особенности расчета сердечников КШД

Диаметр сердечника КШД зависит от диаметра и числа образующих его пучков и может быть определен по следующей зависимости:

$$D_c = \theta D_{пч}, \tag{10.37}$$

где $D_{пч}$ — диаметр элементарного пучка; θ — коэффициент пучковой скрутки.

Коэффициент пучковой скрутки может быть найден из следующих соображений. Так как при общей скрутке отдельные пучки, изменяя свою форму, почти полностью заполняют поперечное сечение сердечника, то

$$S_c = \sum_{i=1}^N S_{пч} = N S_{пч},$$

или

$$D_c^2 = N D_{пч}^2,$$

где N — общее число элементарных пучков в сердечнике.

Следовательно,

$$D_c = \sqrt{N} D_{пч} \text{ и } \theta = \sqrt{N}. \tag{10.38}$$

Диаметр элементарного пучка, скрученного по схеме (2 + 8):

$$D_{10 \times 2} = F_{пч} f_{пч} d_1 = (F_{пч} + 2) f_{пч} d_1 = 3,75 f_{пч} d_1,$$

где $F_{пч}$ — коэффициент скрутки центрального повива, общая формула для расчета которого имеет вид

$$F_{11} = 1 + \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n_{11}}}.$$

Вычисленные по ней значения $F_{11} = \varphi(n_{11})$ для двух, трех, четырех, пяти групп в центральном повиве соответственно: 2; 2,155; 2,414 и 2,7.

В основе расчета коэффициента скрутки жил в пару f_{11c} лежит предположение, что пары в повиве располагаются под углом 45° к горизонтальной плоскости. В 1970-х гг. в результате теоретического исследования произвольного расположения пар в повивах сердечников было получено уточненное значение коэффициента скрутки жил в пару. Для пластмассовой изоляции $f_{11c} = 1,56 \pm 0,008$ с надежностью оценки $P = 0,999$. Экспериментальная проверка подтвердила достоверность полученного результата.

С учетом вышесказанного

$$D_{10 \times 2} = 5,85d_1. \quad (10.39)$$

Диаметр элементарного пятичетверочного пучка

$$D_{5 \times 4} = Ff_4d_1 = (F_{115} + 2)f_4d_1 = 2,64f_4d_1.$$

Для четверочной («звездной») скрутки $f_4 = 2,25$. Тогда

$$D_{5 \times 4} = 5,95d_1. \quad (10.40)$$

В первом приближении можно принять для обоих типов элементарных пучков (ЭП) одинаковый множитель (в среднем 5,9). Тогда

$$D_{\text{ЭП}} = 5,9d_1 \approx 6d_1, \quad (10.41)$$

где $D_{\text{ЭП}}$ — диаметр элементарного пучка.

Число элементарных пучков в сердечнике парной скрутки в 10 раз меньше числа групп $N_{\text{ЭП}} = n_{11}/10$, а в сердечнике четверочной скрутки — в 5 раз $N_{\text{ЭП}} = n_{11}/5$. Исходя из этого диаметр сердечника парной скрутки

$$D_{\text{с.п}} = \sqrt{\frac{n_{11}}{10}} 5,85d_1 = 1,85\sqrt{n_{11}}d_1, \quad (10.42)$$

где n_{11} — общее число пар в сердечнике.

Диаметр сердечника четверочной скрутки

$$D_{\text{с.ч}} = \sqrt{\frac{n_{11}}{5}} 5,95d_1 = 2,65\sqrt{n_{11}}d_1, \quad (10.43)$$

где n_{11} — общее число четверок в сердечнике.

Согласование шагов скрутки при конструировании сердечников

Как уже указывалось, скрутка изолированных жил в группы и групп в пучки преследует две цели: придание кабелю большей гибкости и устойчивости формы и уменьшение взаимных влияний между цепями.

Для достижения необходимой помехозащищенности шаги скрутки отдельных групп должны быть различными. Так как для цифровых кабелей характерна пучковая скрутка сердечника кабеля, то целесообразно предусматривать различные согласованные шаги всех групп, входящих в элементарный 10×2 или 5×4 пучок.

Общая теория взаимных влияний в кабелях связи изложена в [4]. Приведем лишь формулы для расчета согласованных шагов групп.

Для групп, расположенных в одном пучке:

парная скрутка —

$$h_{1_2} / h_{2_2} = (2v \pm 1) / (2w); \quad (10.44)$$

четверочная скрутка —

$$h_{1_4} / h_{2_4} = (4v \pm 1) / (4w), \quad (10.45)$$

где v, w — любые целые положительные числа; h_{1_2}, h_{2_2} — так называемые *эффективные шаги скрутки соседних групп*.

Под *эффективным шагом скрутки* h_3 подразумевается

$$h_3 = \frac{hH}{k_y H \pm h}, \quad (7.46)$$

где h — фактический шаг скрутки группы; H — шаг скрутки пучка; k_y — коэффициент укрутки групп.

При одинаковых направлениях шагов скрутки групп и пучка в знаменателе (10.46) берется знак минус, а при разных направлениях — знак плюс.

В свою очередь,

$$h = \frac{h_3 k_y H}{H \pm h_3}. \quad (10.47)$$

Для обеспечения механической устойчивости групп, что особенно существенно в процессе монтажа, когда необходимо быстро и точно отделять поочередно одну группу от других, шаги скрутки групп в цифровых кабелях не должны превышать 100 мм. Исходя из этого ограничения рассчитаем в качестве примера согласованные значения шагов скрутки двух соседних пар в пучке.

Пусть $h_1 = 85$ мм и $H = 300$ мм; $k = 1,01$; направления скрутки групп и пучка противоположны.

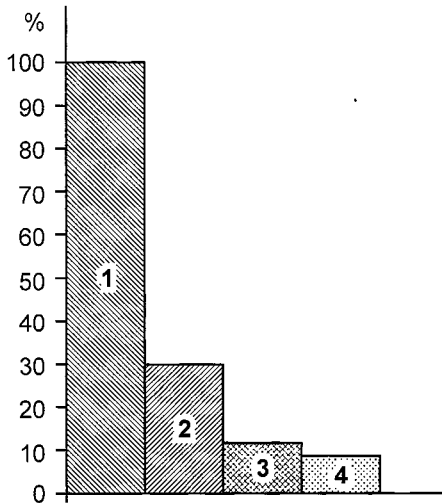


Рис. 10.5. Емкостные связи в цифровых кабелях четверочной скрутки:
 1 — между цепями внутри четверки k (условно принято за 100%); 2 — между цепями различных четверок в пределах элементарного пучка; 3 — между цепями четверок с одинаковыми шагами скрутки в соседних элементарных пучках сердечника; 4 — то же между цепями четверок с разными шагами

Примем $v = 3$; $w = 5$. Тогда согласно (10.46), (10.44) и (10.47):

$$h_1 = \frac{85 \cdot 300}{1,01 \cdot 300 + 85} = 65,7 \text{ мм};$$

$$h_{23} = h_1 \cdot \frac{2w}{2v+1} = 65,7 \cdot \frac{10}{7} = 94 \text{ мм};$$

$$h_2 = \frac{94 \cdot 1,01 \cdot 300}{300 + 94} = 72 \text{ мм}.$$

Исследования показали, что взаимные влияния между цепями, расположенными в различных пучках, во много раз меньше влияний между соседними цепями одного пучка. Поэтому применять различные шаги скрутки соседних элементарных пучков нет необходимости. На рис. 10.5 построена диаграмма соотношений емкостных связей между различно расположенными цепями в кабелях четверочной пучковой скрутки. Основную роль играют емкостные связи внутри четверки k_1 .

Связи между цепями четверок даже с одинаковыми шагами скрутки, но расположенными в различных, хотя бы и в соседних элементарных пучках, в 10 раз меньше, чем k_1 , несмотря на одинаковые шаги и направления скрутки во всех элементарных пучках.

Расчет коэффициента укрутки

Известно, что в процессе любой скрутки происходит так называемая *укрутка скручиваемых элементов*: изолированных жил, групп, пучков. Под укруткой понимается увеличение длины каждого из элементов скрутки, расположенного по спирали вокруг геометрической оси скрутки, по отношению к длине скрученного изделия.

Величина укрутки $У$ представляет собой разность между длиной рассматриваемого элемента скрутки и длиной скручиваемого изделия

$$У = l_{э.с} - l_{изд}.$$

Именно за счет укрутки и возрастают как расход материалов, идущих на изготовление единицы длины скрученного изделия, в данном случае сердечника, так и значения первичных параметров передачи цепей.

Относительная укрутка ΔY выражается в процентах:

$$\Delta Y = \frac{l_{э.с} - l_{изд}}{l_{изд}} \cdot 100\% = (k_y - 1)100\%,$$

где $k_y = l_{э.с}/l_{изд}$ — коэффициент укрутки.

Коэффициент укрутки зависит от кратности шага скрутки. Зависимость эта определяется из рассмотрения развертки на плоскость одного из элементов скрутки и записывается в виде

$$k_y = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_r^2}}, \quad (10.48)$$

где m_r — теоретическая кратность шага скрутки, под которой понимается отношение шага скрутки H интересующего нас изделия (группы, пучка) к диаметру окружности, проходящей по центрам элементов скрутки, образующих данное изделие, $D_{и}$.

Чаше, в первом приближении, пользуются практической кратностью шага скрутки. В этом случае берется отношение шага скрутки к диаметру окружности D , описанной вокруг данного изделия (группы, пучка, сердечника). При этом $D_{нар} = D_{и} + d_{э.с}$ ($d_{э.с}$ — диаметр элементов скрутки, образующих изделие).

Следовательно,

$$m = H/D_{и} \text{ и } m = H/D_{нар} = H/(D_{и} + d_{э.с}).$$

Выражение (10.48) можно несколько упростить, если воспользоваться формулой бинома Ньютона и ограничиться двумя первыми членами ряда:

$$k_y \approx 1 + \frac{1}{2} \pi^2 / m_r^2. \quad (10.49)$$

Можно пойти еще дальше. Так как $\pi^2 = 9,86 \approx 10$, то $k_y \approx 1 + 5/m_r^2$. Если же пренебречь и разностью между m_r и m (что в большинстве случаев допустимо, ибо $m_r/m = D_{и} + d_{э.с}/D_{и}$, то

$$k_y \approx 1 + 5/m^2. \quad (10.50)$$

Рассчитанные значения коэффициента укрутки в зависимости от кратности шага скрутки представлены в табл. 10.6.

Таблица 10.6. Значения коэффициента укрутки в зависимости от кратности шага скрутки

m	k_y	m	k_y	m	k_y
5	1,181	15	1,0215	25	1,008
6	1,129	16	1,019	30	1,0055
7	1,096	17	1,017	35	1,004
8	1,0745	18	1,015	40	1,003
9	1,059	19	1,0135	45	1,0025
10	1,048	20	1,0125	50	1,002
11	1,040	21	1,011	55	1,0016
12	1,034	22	1,010	60	1,0014
13	1,029	23	1,0095	65	1,0012
14	1,025	24	1,0085	70	1,001

Рассмотрим, с какими значениями коэффициента укрутки приходится иметь дело при скрутке сердечников цифровых кабелей.

Коэффициент укрутки $k_{y,гр}$ при скрутке изолированных жил в группы (пары, четверки) определяется из следующих соображений.

Диаметры жил по изоляции $d_1 = 0,7...2,8$ мм, диаметры групп $d_{гр} = 1,5...5,8$ мм, шаги скрутки групп $h_{гр} = 20...100$ мм. В среднем $m = 40$ и $k = 1,003$.

В случае малопарных сердечников кабелей приходится принимать во внимание не два, а больше частных коэффициентов укрутки. Это коэффициент укрутки жил в группу $k_{y,гр}$, коэффициент укрутки групп в элементарный пучок $k_{y,эл}$ и коэффициент укрутки элементарных пучков в сердечник $k_{y,с}$. Таким образом, общий коэффициент укрутки

$$k_y = k_{y,гр} k_{y,эл} k_{y,с}. \quad (10.51)$$

При конструировании цифровых кабелей расчет коэффициента укрутки необходимо производить каждый раз при рассмотрении варианта конструкции.

10.7. Конструирование поясной изоляции

Поясная изоляция в КШД выполняет следующие функции: механически скрепляет скрученный сердечник для сохранения его формы; защищает изоляцию жил, расположенных на внешней стороне сердечника от механических повреждений как в процессе технологических операций по изготовлению кабеля («приваривания» жил), так и в процессе его монтажа; дополнительно усиливает изоляцию жил для защиты цепей от перенапряжений, вызываемых ЭДС, наведенными в цепях кабеля вследствие влияния внешних

электромагнитных полей (от линий электропередачи, контактных сетей электрифицированного транспорта, воздействия грозových разрядов, радиостанций); способствует уравниванию рабочих емкостей цепей, расположенных на внешней стороне сердечника кабеля по отношению к рабочим емкостям цепей, расположенных ближе к центру сердечника.

При конструировании КШД возникают проблемы как выбора материала поясной изоляции, так и ее толщины. Возможны варианты бумажных, полиэтиленовых, поливинилхлоридных, полиамидных, полиэтилентерефталатных (лавсановых) лент.

Для современных заполненных кабелей широкополосного доступа возможно наложение поясной изоляции методом выпрессовывания, т.е. в качестве поясной изоляции применяется трубка из полиэтилена низкой плотности ($\gamma = 0,92-0,93$), внутри которой размещается сердечник кабеля, заполненный гидрофобным компаундом.

В качестве поясной изоляции могут быть применены одно- и двухслойные водоблокирующие ленты, в которых полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка покрыта с одной или с обеих сторон слоем водонабухающего материала. Такая пленка, выполняя функции поясной изоляции, одновременно препятствует проникновению влаги внутрь сердечника кабеля.

Существенный недостаток полиэтиленовых лент — сравнительно невысокая нагревостойкость. При последующем наложении полиэтиленовой оболочки, когда сердечник проходит через головку экструдера, температура которой достигает $220...240\text{ }^{\circ}\text{C}$, полиэтиленовые ленты поясной изоляции, во-первых не защищают полиэтиленовую изоляцию жил от оплавления и, во-вторых, сами привариваются к ней. «Приварка» жил считается технологическим браком при производстве кабелей и совершенно недопустима при производстве цифровых кабелей.

Поливинилхлоридные ленты лишены этого недостатка полиэтиленовых лент, но значительно толще и, кроме того, их присутствие в электрическом поле цепей, расположенных с внешней стороны сердечника нежелательно из-за вдвое большей относительной диэлектрической проницаемости поливинилхлорида ($\epsilon_r = 4...5$) по сравнению с полиэтиленом.

Полиамидные и полиэфирные, в частности полиэтилентерефталатная (лавсановая), пленки обладают высокой нагревостойкостью и значительно большей, чем полиэтилен и поливинилхлорид, разрывной прочностью. Они хорошо защищают полиэтиленовую изоляцию жил от воздействия высокой температуры в головке экструдера. Недостатком, особенно полиамидных пленок, является повышенная относительная диэлектрическая проницаемость: $\epsilon_r = 3,1...3,2$ — для полиэтилентерефталатных пленок и $\epsilon_r \approx 6$ — для

полиамидных. Кроме того, препятствием к применению указанных пленок в качестве поясной изоляции оказалось их малая толщина (0,02...0,05 мм).

Для КШД характерна пучковая скрутка сердечника, поэтому можно отдать предпочтение поясной изоляции из полиэтилентерефталатной пленки. Допустимо применение двух разнородных лент, например, полиэтиленовой и полиэтилентерефталатной.

Определение диаметра сердечника D_c по поясной изоляции производится по следующим формулам:

при изоляции из однородных лент —

$$D_{\text{псн}} = D_c + 2\delta_{\text{псн}} = D_c + 2n_l \delta_l \left(1 \pm \frac{k_a}{100} \right) = D_c + 2n_l \delta_l K_{\text{пай}}, \quad (10.52)$$

где $\delta_{\text{псн}}$ — суммарная толщина поясной изоляции; n_l — число лент; δ_l — толщина ленты; k_a — относительное аксиальное перекрытие одного витка ленты другим, % (знак плюс берется при наложении ленты с перекрытием, минус — при ее наложении с зазором); $K_{\text{па}} = 1 \pm k_a/100$ — коэффициент аксиального перекрытия;

при изоляции из разнородных лент —

$$D_{\text{псн}} = D_c + 2\delta_{\text{псн}} = D_c + 2 \sum_{i=1}^n \delta_{li} \left(1 \pm \frac{k_a}{100} \right) = D_c + 2 \sum_{i=1}^n \delta_{li} K_{\text{пай}}. \quad (10.53)$$

Если все разнородные ленты накладываются с одинаковым перекрытием, то

$$D_{\text{псн}} = D_c + 2K_{\text{па}} \sum_{i=1}^n \delta_{li}. \quad (10.54)$$

Масса поясной изоляции, кг/км, выражается в общем виде зависимостью

$$M_{\text{псн}} = \pi (D_c + \delta_{\text{псн}}) \delta_{\text{псн}} \gamma, \quad (10.55)$$

где γ — плотность изоляционного материала, г/см³.

Соответственно для двух рассмотренных вариантов имеем:

использование однородных лент —

$$M_{\text{псн}} = \pi (D_c + n_l \delta_{\text{псн}} K_{\text{па}}) n_l \delta_{\text{псн}} K_{\text{па}} \gamma; \quad (10.56)$$

использование разнородных лент —

$$M_{\text{псн}} = \pi \left(D_c + \sum_{i=1}^n \delta_{li} K_{\text{пай}} \right) \sum_{i=1}^m \delta_{li} K_{\text{пай}} \gamma, \quad (10.57)$$

или при $K_{\text{пай}} = \text{const}$ —

$$M_{\text{псн}} = \pi \left(D_c + \sum_{i=1}^n \delta_{li} \right) K_{\text{па}} \sum_{i=1}^m \delta_{li} \gamma. \quad (10.58)$$

10.8. Конструирование и расчет оболочек и экранов

Надежность и долговечность КШД, стабильность их электрических параметров в значительной степени определяются конструкцией и свойствами оболочек.

Оболочка должна сохранять свойства токопроводящих жил и их изоляции в течение всего многолетнего срока эксплуатации кабелей, т.е. защищать цепи кабеля от возможных внешних влияний, к числу которых относятся: физические — воздействие влаги и паров влаги; механические — воздействие растягивающих усилий при прокладке кабелей; сжимающих усилий от давления других кабелей, расположенных в канале; ударных нагрузок, возможных при прокладке кабелей по дну рек и водоемов и в других случаях, например, при воздействиях различных строительных механизмов на кабели, проложенные непосредственно в грунте или даже в телефонной канализации; химические — воздействие различных химических агентов (газообразных и жидких); электрические — воздействие внешних электромагнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи и контактными сетями электрифицированного транспорта, входящими в черту города, радиостанциями, грозowymi разрядами, соседними кабелями высокого напряжения, находящимися в одном коллекторе, и т.п.

В тех случаях когда оболочка какими-нибудь из необходимых свойств не обладает, предусматриваются дополнительные защитные конструктивные элементы. Это — наружные защитные покровы, включающие броню из стальных лент, стальной сетки или стальных круглых проволок, и накладываемые с целью усиления механической защиты; гидрофобный наполнитель и водоблокирующие элементы, применяемые для усиления влагозащитных свойств пластмассовой оболочки. Пластмассовая оболочка не обеспечивает электрическую защиту цепей. Поэтому в сочетании с ней обязательно предусматривается металлический защитный элемент, как правило, экран.

Являясь конструктивным элементом кабеля, оболочка не только защищает сердечник, но и должна защищать себя от тех внешних факторов, которые воздействуют на кабель. При этом на отдельные из них некоторые оболочки реагируют сильнее, чем сердечник. Поэтому к оболочкам предъявляются также следующие требования: *гибкость* — для возможности изгиба кабелей при их укладке в канализационных колодцах; *стойкость к многократным изгибам*, которым подвергаются кабели на завершающих этапах процесса производства и при их прокладке; *стойкость к вибрациям*, испытываемым кабелями при транспортировке и в процессе эксплуатации; *стойкость к коррозии* — химической и электрохимической, вызываемой блуждающими электрическими токами; *стойкость к механическим* — растягивающим, сжимающим, ударным — *нагрузкам*.

Материал оболочки должен быть недефицитен, дешев и технологичен, т.е. допускать формирование оболочки в виде непрерывной трубки промышленными способами; оболочки должны обладать по возможности меньшей массой для уменьшения стоимости кабелей, облегчения их транспортировки и прокладки.

В задачу конструирования оболочек и экранов входит выбор:

- типа оболочки — металлической или пластмассовой, а также материала оболочки данного типа;
- конструкции оболочки — гладкой, просто пластмассовой или металлопластмассовой, определение ее толщины и необходимых параметров;
- материала и конструкции экрана, определение его толщины и параметров.

Полиэтиленовая оболочка заменила свинцовую в кабелях с полиэтиленовой изоляцией и широко применяется во всех странах. В США она именуется «алпэт». За кратким и звучным названием скрываются по существу два конструктивных элемента: гофрированный продольно наложенный алюминиевый («ал») экран и обычная полиэтиленовая («пэт») оболочка. Для кабелей, прокладываемых в пожароопасных местах, предусматривается поливинилхлоридная оболочка. В США это — оболочка «алвин». Недостатком последней считается выделение при горении ядовитых соединений хлора — галогенов. Поэтому в последнее время находят все более широкое применение оболочки из галогенонесодержащих компаундов различного класса стойкости к воздействию высокой температуры. Недостатком всех видов пластмассовых оболочек считается их влагопроницаемость.

Для уменьшения влагопроницаемости пластмассовых оболочек в 1961 г. была предложена так называемая *металлопластмассовая оболочка*, представляющая собой соединение в одно целое пластмассовой (полиэтиленовой) оболочки и тонкостенного экрана из алюминиевой фольги. Металлопластмассовая оболочка (согласно определению терминологического стандарта) — это пластмассовая оболочка с тонким слоем металла изнутри. Металлический слой служит барьером на пути диффузии паров влаги через полиэтиленовую оболочку. В первые годы внедрения такая оболочка была широко известна под названием «барьер Гловера» (по имени ее изобретателя английского инженера Д.В. Гловера).

Алюмополиэтиленовые оболочки получили широчайшее распространение во всем мире. Так же как металлические (свинцовая или алюминиевая), металлопластмассовая оболочка объединяет функции экрана и оболочки, но в отличие от первых двух является не однородным, а комбинированным конструктивным элементом.

Экран как конструктивный элемент кабелей в отличие от оболочки насчитывает всего четыре десятилетия. Потребность в экране возникла при

внедрении полиэтиленовой, а затем и стальной оболочки. Практическое распространение получили экраны, накладываемые как продольно, так и спирально. Продольно накладываемые экраны могут предварительно гофрироваться. Кабели с таким гофрированным экраном лучше противостоят многократным изгибам.

Полиэтиленовая и алюмополиэтиленовая оболочки изготавливаются из светостабилизированного полиэтилена низкой плотности ($\gamma = 0,92-0,93$), в котором равномерно диспергировано примерно 2,5% сажи (по массе). Полиэтилен высокой плотности для оболочек не рекомендуется, так как последние не обладают достаточной гибкостью.

Во избежание растрескивания оболочки под воздействием механических напряжений в процессе прокладки, монтажа и эксплуатации кабелей должен применяться полиэтилен с относительно невысоким показателем текучести расплава — ПТР (meltindex), не более (0,3...0,4) г/10 мин.

Алюмополиэтиленовая оболочка изготавливается из такого же полиэтилена. Продольный алюминиевый экран толщиной 0,1...0,15 мм с одной или обеих сторон покрыт полиэтиленовой пленкой толщиной 0,02...0,05 мм. Из двух вариантов металлопластмассовой оболочки предпочтение должно быть отдано оболочке с экраном из трехслойной, т.е. покрытой пленкой с обеих сторон, алюминиевой ленты. Существенные преимущества этой конструкции заключаются в ее большей влагонепроницаемости и становятся очевидными из рассмотрения рис. 10.6.

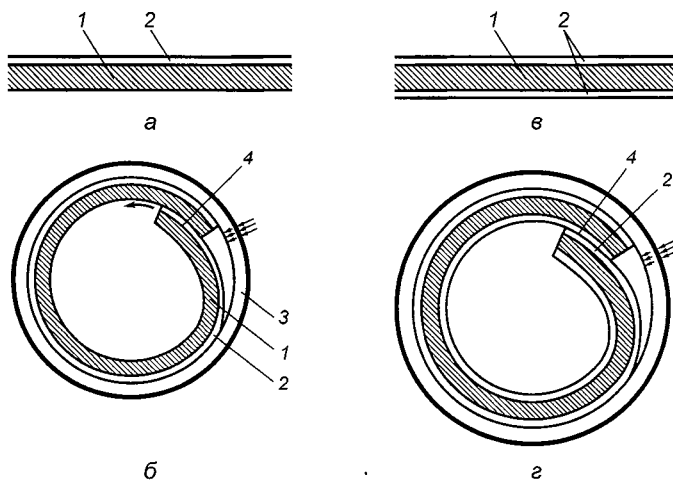


Рис. 10.6. Алюмополиэтиленовые ленты двухслойная (а) и трехслойная (е) и металлопластмассовые оболочки на их основе (соответственно б и з);

1 — алюминиевая лента; 2 — полиэтиленовая пленка;
3 — полиэтиленовая оболочка; 4 — перекрывающиеся края ленты

В оболочке с экраном из двухслойной алюминиевой ленты (рис. 10.6, а) перекрывающиеся края последней просто соприкасаются, но не соединены между собой. На рис. 10.6, б видно, что в перекрытии соприкасается полиэтиленовая пленка нижнего края с алюминиевой лентой верхнего края. (Следует учитывать, что двухслойный экран накладывается всегда так, чтобы алюминиевая его сторона касалась поясной изоляции сердечника, т.е. была бы снизу, а полиэтиленовая сторона — сверху и соприкасалась с полиэтиленовой оболочкой, к которой она приваривается при нагреве в головке экструдера.) Диффундирующие сквозь полиэтиленовую оболочку пары влаги, встречая на своем пути тонкий металлический барьер, обтекают его по направлению к негерметизированному шву и проходят между краями ленты внутрь кабеля. Естественно, что скорость диффузии при этом значительно меньше (в 20–200 раз), чем в случае обычной полиэтиленовой оболочки без приваренного к ней изнутри металлического слоя.

В оболочке с экраном из трехслойной ленты (рис. 10.6, в) между собой соприкасаются два слоя полиэтиленовой пленки: верхний слой нижнего края экрана с нижним слоем верхнего края (рис. 10.6, г). Оба слоя свариваются между собой. Таким образом, на пути паров влаги оказывается не открытый шов, а узкий «полиэтиленовый» барьер. Конечно, пары влаги будут диффундировать и через этот неметаллический, следовательно, влагопроницаемый барьер. Но скорость диффузии все же по сравнению с оболочкой, рассмотренной ранее, уменьшается еще в сотни раз.

Продольный гладкий экран, составляющий часть металлопластмассовой оболочки, по всем показателям имеет преимущества перед отдельными экранами. Помимо того, что этот экран придает намного большую влагонепроницаемость полиэтиленовой оболочке, он стоек к многократным изгибам и обладает большой коррозионной стойкостью, что особенно существенно для алюминия.

И все же в зависимости от конкретных условий производства может возникнуть необходимость конструирования в кабелях различных экранов. Так, в кабелях с гидрофобным заполнением сердечника практически нет необходимости применять трехслойный экран, так как влага не проникает через экран в сердечник кабеля. Практически блокируется только проникновение влаги между оболочкой и экраном кабеля.

Могут возникнуть вопросы выбора спирального или продольного экрана, а в случае продольного — гладкого или гофрированного. Главным преимуществом продольных экранов перед спиральными является то, что они более технологичны. Спиральное наложение экранной ленты связано с вращением рабочего узла машины, число оборотов которой естественно ограничено. Следовательно, ограничена и линейная скорость процесса экранирова-

ния, что особенно неблагоприятно, если экранирование производится одновременно со скруткой сердечника, его пропиткой гидрофобным наполнителем и наложением поясной изоляции. Именно такое сочетание имеет место при современных технологиях производства. В результате наложение спирального экрана лимитирует скорость изготовления экранированного сердечника и производительность технологической линии в целом. Продольное наложение экранной ленты может осуществляться с практически неограниченной скоростью и совмещается с операцией наложения полиэтиленовой оболочки.

Гладкий продольный экран экономичнее гофрированного. На него расходуется меньше материала. Кроме того, кабели с гофрированным экраном имеют несколько больший диаметр, что в сочетании с гофрировкой вызывает, естественно, больший расход материала оболочки.

Вместе с тем исследования показывают, что в одинаковых кабелях трещины гладкого экрана наступали после 10 циклов изгиба, а гофрированного — после 15...20. Гладкий продольный экран наиболее часто применяется в относительно тонких кабелях с диаметром сердечника до 20 мм, к которым вполне могут быть отнесены и КШД.

Глава 11. Особенности технологии изготовления универсальных кабелей СКС и КШД

11.1. Общие сведения об основном технологическом оборудовании, применяемом при производстве КШД

Технология производства КШД и последовательность технологических операций зависят главным образом от конструкции кабеля, в свою очередь, обусловленной назначением и требованиями, предъявляемыми к его эксплуатационным характеристикам.

Так как КШД представляет собой совокупность медных жил, изолированных каждая в отдельности полиэтиленом, скрученных в пары, группы, элементарные пучки и сердечник, покрытых сверху поясной изоляцией, экраном, защитными покровами и броней и заключенных в общую герметичную полиэтиленовую оболочку, цикл производства КШД включает технологические операции:

- изготовление медных токопроводящих жил способом волочения;
- изолирование токопроводящих жил;
- скрутка изолированных жил в группы (пары или четверки);
- скрутка изолированных групп в элементарные пучки (пяти- или десятипарные);
- скрутка элементарных пучков в сердечник кабеля;
- наложение на сердечник кабеля покровов в виде поясной изоляции, экрана, защитных покровов;
- пропитка сердечника кабеля гидрофобным наполнителем;
- наложение защитной оболочки из полиэтилена.

Анализ технологических схем производства КШД на кабельных заводах России позволяет выделить основные технологические линии по производству полуфабрикатов для сборки кабеля.

1. Линии по производству изолированных жил.
2. Линии скрутки групп и элементарных пучков.
3. Линии скрутки главных пучков (сердечников) кабелей.
4. Линии пропитки сердечников кабелей гидрофобным наполнителем и наложения поясной изоляции.
5. Линии наложения экранов и брони.
6. Линии наложения оболочки (шланга).

7. Линии испытаний и приемки кабелей.

8. Линии упаковки и сдачи готовой продукции.

Каждый механизм или станок, входящий в вышеперечисленные линии, объединены общей задачей производства полуфабриката кабеля. На выходе каждой линии появляется либо катушка, либо моток (бухта), либо контейнер, либо барабан с полуфабрикатом.

Современная технология производства кабелей имеет явно выраженную тенденцию к так называемой *технологии «на проход»*, т.е. к совмещению отдельных технологических операций. Тогда при их совмещении в одну последовательную цепочку достигается значительная экономия рабочего времени, повышается производительность труда как за счет исключения ряда промежуточных операций (перемотка, установка и выгрузка приемо-отдающей тары, межоперационная транспортировка заготовок и т.д.), так и за счет экономии производственных площадей и рабочей силы. Кроме того, улучшаются возможности более широкой и комплексной автоматизации производственных процессов и контроля продукции. В конечном итоге все это отражается на себестоимости кабеля.

В зависимости от конструкции КШД могут применяться различные технологические составляющие общего производственного цикла. Например, для обеспечения влагонепроницаемости водоблокирующих элементов при их использовании в конструкции кабеля технологический цикл предполагает наличие соответствующей технологической операции и, как следствие, отсутствие операции пропитки сердечника кабеля гидрофобным наполнителем и т.п.

Рассмотрим технологические процессы производства КШД.

11.2. Основные схемы производства изолированных токопроводящих жил

Технологическая схема производства изолированных токопроводящих жил включает ряд операций (рис. 11.1):

- изготовление медных токопроводящих жил способом волочения;
- отжиг токопроводящих жил;
- наложение изоляции на медную жилу;
- охлаждение изолированной жилы;
- проведение промежуточного контроля качества;
- намотка готовой изолированной жилы на приемники.

Схема производства изолированной жилы при этом выглядит следующим образом.

Медная проволока (подтяжка) из отдающих устройств 1 через систему направляющих колес поступает в волочильную машину 2, где происходит процесс волочения и придания токопроводящей жиле требуемого диаметра. Из волочильной машины медная жила поступает в шкаф отжига 3, отжигается и через компенсатор и систему предварительного подогрева поступает в головку экструдера 5. Из устройств смешивания и подачи полиэтилена и красителя 4 в головку из экструдеров подается смесь полиэтиленов, а из станции закачки газа подается в основной экструдер газ (при изготовлении пленко-пористой пленочной изоляции ТПЖ). После выхода из головки экструдера изолированная жила поступает в охлаждающее устройство 7, выполненное в виде ванны, наполненной циркулирующей водой. За ванной размещается устройство для удаления влаги с поверхности изоляции. Для контроля и регулирования размеров накладываемой изоляции в линии применяются измерители диаметра и приборы контроля параметров изолированной жилы. Роль тягового устройства и накопителя готовой жилы выполняет автоматическое сдвоенное устройство 9.

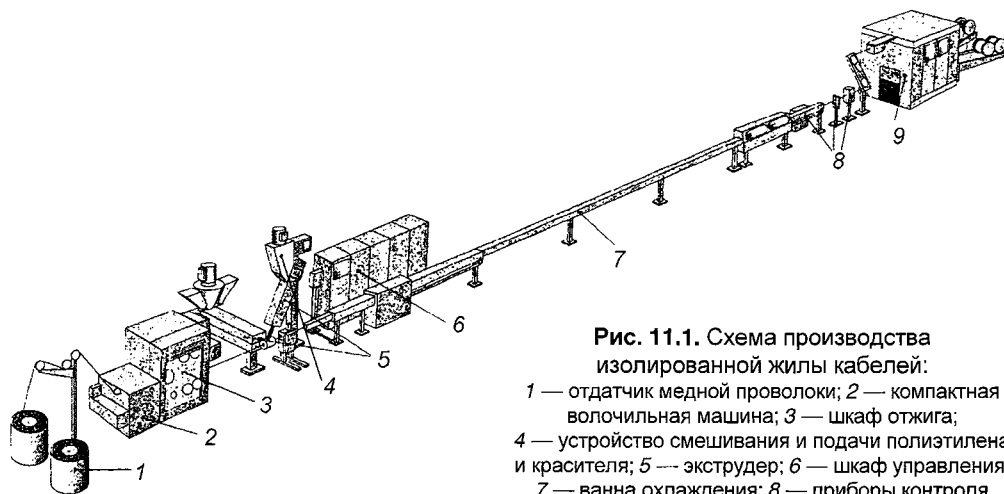


Рис. 11.1. Схема производства изолированной жилы кабелей:

- 1 — отдачик медной проволоки; 2 — компактная волочильная машина; 3 — шкаф отжига; 4 — устройство смешивания и подачи полиэтилена и красителя; 5 — экструдер; 6 — шкаф управления; 7 — ванна охлаждения; 8 — приборы контроля параметров; 9 — автоматическое сдвоенное приемное устройство

Для производства изолированной жилы кабелей используются высокоскоростные линии для наложения одно-, двух- или трехслойной изоляции токопроводящей жилы. Полностью автоматические и простые в эксплуатации, эти линии служат эффективным инструментом для производства сплошной, пленко-пористой (получается методами химического и физиче-

ского вспенивания) и пленко-пористо-пленочной изоляции (получается методом физического вспенивания).

Для достижения высоких и постоянных скоростей производства изолированных жил для КШД наложение изоляции (экструзия) может быть (и как правило) совмещено с процессом волочения.

Характеристики современных линий по производству изолированной жилы представлены в табл. 11.1.

Таблица 11.1. Технические характеристики современных линий изолирования токопроводящих жил

№ п/п	Наименование параметра	Тип линии			
		TEL 20F	TEL 25F	TEL 30F	TEL 35F
1	Фирма-производитель	Maillefer	Maillefer	Maillefer	Maillefer
2	Входной диаметр медной жилы, мм	max 2,7	max 2,7	max 2,7	max 2,7
3	Выходной диаметр медной жилы, мм	0,32...0,90	0,32...0,90	0,32...0,90	0,32...0,90
4	Диаметр по изоляции, мм	max 3,0	max 3,0	max 3,0	max 3,0
5	Конструктивная скорость линии, м/мин	250...2500	250...2500	250...2500	250...2500
6	Номинальная скорость производства, м/мин				
	Сплошная полиэтиленовая изоляция				
	жила 0,40мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,71мм	2100	—	2100	—
	0,50мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,89мм	2400	—	2300	—
	0,51мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,89мм	—	2400	—	2300
	0,64мм, $D_{нар. из.ж}$ 1,10мм	—	2000	—	2000
	0,90мм, $D_{нар. из.ж}$ 1,57мм	1250	—	1400	—
	Пленко-пористая изоляция (степень вспенивания — 30...42%)				
	жила 0,40мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,72мм	2100	—	—	—
	0,50мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,89мм	2200	—	—	—
	0,51мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,90мм	—	2000	—	—
	0,63мм, $D_{нар. из.ж}$ 1,12мм	—	1800	—	—
	0,90мм, $D_{нар. из.ж}$ 1,60мм	1200	—	—	—
	Пленко-пористая пленочная изоляция (степень вспенивания max — 65%)				
	жила 0,40мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,72мм	—	—	2200	2300
	0,50мм, $D_{нар. из.ж}$ 0,90мм	—	—	2350	2000
	0,64мм, $D_{нар. из.ж}$ 2,20мм	—	—	—	700
	0,80мм, $D_{нар. из.ж}$ 1,40мм	—	—	1500	—

Продолжение табл. 11.1

№ п/п	Наименование параметра	Тип линии			
		TEL 20F	TEL 25F	TEL 30F	TEL 35F
7	Свойства изолированной жилы				
	Отклонения диаметра по изоляции толщина изоляции менее 0,3 мм толщина изоляции более 0,3 мм	$\pm 0,01$ мм $\pm 1\%$	$\pm 0,01$ мм $\pm 1\%$	$\pm 0,01$ мм $\pm 1\%$	$\pm 0,005$ мм $\pm 1\%$
	Отклонения емкости C :				
	$C_{\text{НОМ}} > 200$ пФ/м $C_{\text{НОМ}} < 200$ пФ/м	$\pm 1\%$ ± 2	$\pm 1\%$ $\pm 1,5 \dots 2,0$	$\pm 1\%$ ± 2	$\pm 1\%$ $\pm 1 \dots 1,5$
8	Концентричность	90...95%	$\geq 90 \dots 95\%$	90...95%	$\geq 90 \dots 95\%$

11.3. Изготовление токопроводящих жил

Токопроводящие жилы КЩД выполняются из меди методом волочения. *Волочением* называется способ обработки меди давлением, при котором медь в виде проволоки или прутка протягивается через отверстие, поперечные размеры которого меньше, чем размеры исходного поперечного сечения протягиваемого металла. Волочение имеет ряд преимуществ перед другими способами обработки металлов:

- значительно экономичнее, так как при обработке не образуется стружки;
- обеспечивается высокое качество поверхности и высокая точность размеров протягиваемых изделий;
- значительно улучшаются механические свойства изделия, особенно его прочность.

В КЩД поперечное сечение токопроводящих жил имеет вид круга.

Инструмент, с помощью которого осуществляется процесс волочения, называется *волокой* (рис. 11.2).

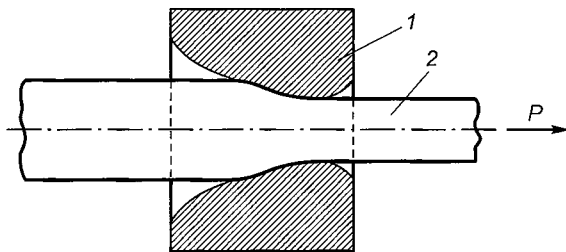


Рис. 11.2. Схема процесса волочения:
1 — волока; 2 — протягиваемое изделие

Сила, которая прикладывается к переднему концу протягиваемого металла, называется *силой волочения* P . Она определяет количество энергии, затрачиваемой на волочение, необходимую мощность привода волочильной машины и прочность ее деталей.

Под действием силы волочения медь во время процесса волочения деформируется, т.е. меняет свою начальную форму и размеры. При этом значительно повышается твердость и пластичность меди. Способность к дальнейшему волочению снижается. Особое значение имеет и тот фактор, что при холодной деформации снижается электропроводность меди.

Заготовка для волочения проволоки и подготовка ее к волочению. Заготовкой для медной проволоки является катанка, получаемая горячей прокаткой на проволочно-прокатных станах.

Сырьем для производства медной катанки служат слитки, изготавливаемые на заводах цветной металлургии способом непрерывной вертикальной отливки.

Свойства медной проволоки зависят от химического состава медных слитков. В слитках вертикальной, наиболее современной отливки содержится не более 0,05% всех примесей и не более 0,0035% кислорода.

Форма и размер поперечного сечения медной катанки могут быть различными, но, как правило, ее диаметр составляет 8 мм. Из катанки таких размеров можно изготавливать медную проволоку диаметром от 5,0 до 0,02 мм.

При горячей прокатке меди на поверхности катанки образуется слой окислов — окалина, которая обладает большей твердостью и хрупкостью, чем основной металл. Перед волочением этот слой удаляют путем химического травления в водных растворах кислот. В результате травления поверхность катанки покрывается чистой медью в виде мельчайшего порошка. После промывки водой и окончательной нейтрализации кислоты в растворе мыла катанка готова к дальнейшей переработке. Для улучшения качества поверхности проволоки перед дальнейшим волочением проводят операцию скальпирования. Суть ее заключается в снятии тонкого слоя (до 0,2 мм) меди с поверхности катанки, содержащего дефекты прокатки. Эта операция улучшает качество поверхности проволоки, но увеличивает ее стоимость.

Волоочильное оборудование. Для осуществления операции волочения применяются *волоочильные машины*.

Машины многократного волочения подразделяются на машины без скольжения и машины со скольжением.

У волоочильных машин без скольжения отсутствует скольжение между обрабатываемым металлом и поверхностью тягового барабана.

Машины многократного волочения со скольжением в современных условиях являются основным типом машин, используемых в кабельной промышленности для производства кабелей. Машины этого типа отличаются большим разнообразием конструкций, которые определяются размерами и свойствами протягиваемой проволоки.

Во время волочения на машинах со скольжением число витков, намотанных вокруг каждого тягового барабана (ролика), не меняется, а витки проволоки накапливаются только на приемном барабане или приемной катушке. Скорость вращения барабанов на этих машинах больше скорости проволоки, т.е. барабаны проскальзывают внутри витков проволоки, число которых на каждом барабане составляет 2–4. Нормальным считается, когда разница в скорости барабана и проволоки на нем (скольжение) составляет 3–5%.

Скольжение проволоки на барабанах ухудшает качество поверхности проволоки, вызывает износ барабанов (бандажей) и требует значительных затрат мощности на преодоление сил трения. Вместе с тем машины со скольжением обладают рядом преимуществ по сравнению с машинами других типов, что обеспечивает им самое широкое применение.

Многokrатные машины со скольжением конструктивно проще, чем машины без скольжения, компактнее и удобнее при заправке проволоки. Эффективная система охлаждения позволяет осуществлять на них волочение на высоких скоростях (до 2500 м/мин).

По расположению и конструкции тяговых роликов (барабанов) машины со скольжением могут быть разделены на следующие группы:

- машины с вертикальными цилиндрическими роликами (ось ролика горизонтальная);
- машины с горизонтальными цилиндрическими роликами (ось ролика вертикальная);
- машины с вертикальными ступенчатыми роликами;
- машины с горизонтальными ступенчатыми роликами.

Машины с цилиндрическими тяговыми роликами применяют в основном для волочения фасонной проволоки и круглой проволоки больших размеров.

Наиболее широкое распространение, в том числе и для производства токопроводящих жил КШД, получили машины с вертикальными ступенчатыми тяговыми роликами. Эти машины имеют от 9 до 25 волок и могут иметь от одного до нескольких ступенчатых роликов. Повышение окружных скоростей на отдельных ступенях волочения достигается увеличением диаметров ступеней роликов. Машины могут иметь либо все ступенчатые ролики рабочими, либо попарно: один — рабочий, а другой — направляющий. Рабочие поверхности ступенчатых роликов современных машин образуются сменными кольцами из стальной ленты (бандажами) или наплавляются износостойкими сплавами.

В машинах с горизонтальными роликами обычно ролики вместе с волоками помещаются в смазочную эмульсию.

Машины с вертикальными роликами снабжаются эффективными циркуляционными системами, подводящими эмульсию непосредственно к волокам.

Технические характеристики некоторых типов машин многократного волочения со скольжением приводятся в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Технические характеристики машин многократного волочения со скольжением

Тип машины	Завод-изготовитель (фирма)	Количество волок	Диаметр заготовки, мм	Диаметр готовой проволоки, мм	Мощность двигателя, кВт	Скорости волочения, м/с
СМВ-11-9М	АЗГМ	9	8...7	4...1,6	100	8...15
ВМ-13П	АЗГМ	13	8...7	2,3...1,0	125	8...20
FT-13	«Хенрих» (Германия)	13	8...6,35	3,0...1,0	154	До 30
2417	«Хенрих» (Германия)	17	2,5	1,0...0,4	37	13...30
М15	«Нихоф» (Германия)	21	2,0	0,4...0,14	18	До 45
ММ/5	«Самп» (Италия)	21	0,8...0,3	0,15...0,05	4,5	До 32
ММ/6	«Самп» (Италия)	16	0,2	0,05...0,0125	1,1	До 20

Размоточные устройства. Для размотки и подачи заготовки в волочильные машины применяют отдатчики различной конструкции в зависимости от размера и формы сечения заготовки.

Различают отдатчики двух типов: с неподвижным мотком (бухтой) или катушкой и с подвижным мотком или катушкой. Схемы подачи заготовки в волочильные машины представлены на рис. 11.3.

Отдатчик с подвижным мотком (рис. 11.3, а) применяют для подачи в машины фасонной заготовки. Отдатчики этого типа представляют собой деревянные или металлические конусы, вращающиеся вокруг вертикальной оси. Заготовка 1 с конуса 2 подается под ролик 3, проходит через ванну со смазкой и через волоку 4 поступает на тяговую шайбу 5.

При использовании отдатчиков с подвижным мотком невозможно сваривать заготовку без остановки волочильной машины, что приводит к снижению ее производительности. К недостаткам отдатчиков данного типа следует также отнести их большую инерционность, поэтому их приходится оснащать тормозами; большая инерция отдатчиков иногда считается причиной обрыва проволоки при пуске машины или ее запутывания при остановке машины.

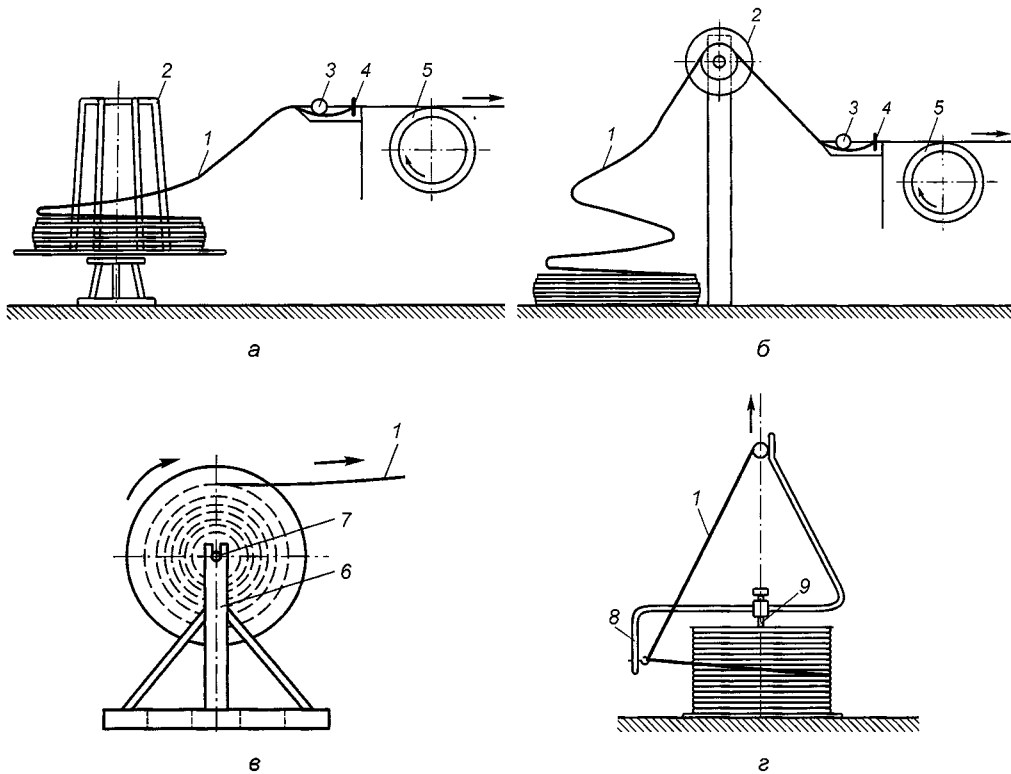


Рис. 11.3. Отдатчики:

а — с вращающимся мотком; б — с неподвижным мотком;
 в — с вращающейся катушкой; г — с неподвижной катушкой

Отдатчик с неподвижным мотком (рис. 11.3, б) применяют для подачи в машину катанки или подтяжки проволоки круглого сечения. Заготовка 1 с уложенного на стеллаж (поддон) или на пол мотка снимается витками и поступает на ролик 2. Во избежание запутывания заготовки ролик должен быть расположен на высоте 2–3 м над мотком и ориентирован по его центру. С первого ролика проволока подается под второй ролик 3 на машине, проходит через ванну со смазкой и через волоку 4 поступает на тяговую шайбу 5. Так как при этом способе подачи моток заготовки лежит неподвижно, можно освободить нижний конец мотка и приварить к нему, не останавливая машины, верхний конец другого мотка. Этим обеспечивается непрерывная подача заготовки в машины.

Отдатчик с вращающейся катушкой (рис. 11.3, в) применяют для подачи в машину проволоки, намотанной на катушки. Катушка с проволокой 1 уста-

навливается на стойку 6 с помощью специального вала 7. Основным недостатком данного способа — усилие для вращения катушки передается через проволоку, что при волочении тонкой проволоки может вызвать обрывы. Кроме того, такой способ требует приспособлений для торможения катушки, так как при обрыве проволоки внутри машины катушка по инерции вращается и проволока запутывается.

Отдатчик с неподвижной катушкой (рис. 11.3, з) применяют при среднем и тонком волочении. Заготовка 1 с катушки направляется в машину через специальные ушки специального приспособления (флайера) 8. Водило флайера при этом начинает вращаться на пальце 9, вставляемом в центральное отверстие катушки, в сторону, противоположную той, на которую намотана проволока на катушке. При вращении водило флайера будет разматывать с катушки проволоку.

Этот способ в отличие от подачи с вращающейся катушки удобен тем, что заготовка не испытывает натяжений, а при обрыве проволоки внутри машины флайер останавливается и заготовка не запутывается.

В настоящее время широкое применение получил способ подачи медной проволоки из контейнеров. Контейнер представляет собой цилиндрическую бочку, внутри которой размещен центральный цилиндрический стержень. В промежуток между стержнем и бочкой укладывается медная проволока способом, исключающим перехлест и перепутывание витков. Проволока в волочильную машину подается через систему колес и поддерживающих роликов.

Технологический инструмент для волочения — волока

На кабельных заводах при производстве кабелей применяются волоки из твердых сплавов и технических алмазов.

Волоки из твердых сплавов служат для волочения проволоки диаметром 0,3...50 мм.

Твердые сплавы отличаются высоким сопротивлением износу, высоким пределом прочности на сжатие, большой коррозионной стойкостью и хорошо противостоят воздействию щелочных эмульсий и других смазочных материалов. Твердые сплавы имеют низкий предел прочности при растяжении. Чтобы предотвратить разрушение твердосплавной волоки от растягивающих усилий, возникающих в канале волоки при волочении, заготовку из твердого сплава закрепляют в стальной обойме, которая воспринимает на себя эти усилия. Кроме того, наличие обойм облегчает процесс обработки канала волоки, особенно волок малых размеров, и установку их в волочильные машины.

Твердосплавные заготовки получают прессованием порошка, состоящего из карбида вольфрама и кобальта с последующим спеканием.

Твердосплавные заготовки в стальной обойме крепятся пайкой, холодной или горячей запрессовкой.

При горячей запрессовке обойму нагревают до 1000–1100 °С, а заготовку — до 700 °С, после чего заготовку вставляют в обойму и запрессовывают на прессе с помощью специального штампа.

Черновое отверстие в твердосплавной волоке получают при изготовлении твердосплавных заготовок в процессе прессования и сникания из порошкообразного материала. Если же твердосплавная заготовка изготовлена без черного отверстия, то оно высверливается на сверлильных станках.

С целью получения требуемых размеров, формы и чистоты поверхности волоочильный канал твердосплавных волок обрабатывают на шлифовальных и полировочных станках с помощью специального инструмента.

По мере износа волок они переделываются на ближайший больший размер.

Чтобы продлить срок службы волок, необходимо в процессе волочения принимать следующие предохранительные меры:

- не допускать волочения катанки с остатками на ее поверхности окалин и загрязнений;
- следить за непрерывным поступлением эмульсии в волоку;
- не перегревать волоки;
- своевременно производить ремонт волок.

Алмазные волоки применяют для волочения медной проволоки диаметром менее 1,2 мм.

Из всех известных материалов алмаз имеет наибольшую твердость и износоустойчивость. В то же время он очень хрупок и может противостоять давлению протягиваемого металла только при малых диаметрах отверстий. Чтобы повысить стойкость алмаза, обеспечить удобное обращение с ним при установке на машинах и при восстановительном ремонте, его закрепляют в обойме.

Для изготовления волок применяют искусственные алмазы весом 0,1...0,6 карата с твердой сердцевиной. Алмазы для изготовления волок должны быть свободны от внутренних дефектов — трещин, газовых пузырей, пустот и посторонних включений.

При изготовлении волоки алмазный камень сначала вставляют в обойму, а затем подвергают сверлению, шлифовке и полировке. Алмазный камень в обойме закрепляют заливкой легкоплавким сплавом или запрессовкой.

Наиболее ответственной и длительной операцией в процессе всей разделки алмаза является сверление основной части волоочильного канала: смазочной, рабочей и калибрующей зон. Сверление производят специальным инструментом с использованием абразивной смеси, состоящей из алмазной пудры и специального масла. Современные технологии предусматривают применение для сверления алмазов ультразвуковых установок и лазеров.

Отжиг проволоки. При волочении медной проволоки изменяются свойства протягиваемого металла: прочность увеличивается (как говорят металл «нагартовывается»), а пластичность и электропроводность снижаются. Для повышения пластичности и электропроводности медной проволоки проводят ее отжиг, т.е. нагрев при определенной температуре.

Отжиг медной проволоки в зависимости от ее размера и продолжительности нагрева производится в диапазоне температур 350...650 °С. При таких температурах нагрев меди в присутствии воздуха приводит к окислению поверхности проволоки. Для предохранения медной проволоки от окисления отжиг производят в защитной атмосфере. В качестве защитной атмосферы при отжиге медной проволоки, как правило, применяют водяной пар.

Отжиг проводят в специальной установке (см. рис. 11.1, поз. 3) контактным способом. При этом проволока нагревается путем пропускания через нее электрического тока. Контактный отжиг совмещается с процессом волочения. Проволока в процессе волочения после прохождения через последнюю волоку поступает на специальные контактные колеса, при помощи которых к ней подается электрический ток, нагревающий проволоку в доли секунды. Нагрев обычно осуществляется в две стадии: *предварительный* нагрев до температуры ниже температуры интенсивного окисления в атмосфере воздуха, *окончательный* нагрев до температуры отжига в атмосфере водяного пара. Ток для нагрева подается к колесам через трансформатор. Для создания необходимой температуры при отжиге проволоки различного диаметра регулируется напряжение.

После отжига и охлаждения проволока перед входом в экструдер для наложения изоляции подогревается в специальном устройстве до 100...150 °С. При этом остатки влаги с поверхности проволоки испаряются и обеспечивается лучшая адгезия полиэтилена изоляции жилы к меди. Подогрев жилы осуществляется путем пропускания электрического тока по участкам жилы, находящимся между двумя контактными роликами.

11.4. Изолирование токопроводящих жил

Схема экструдера. В процессе производства КШД с полиэтиленовой изоляцией токопроводящей жилы широкое распространение получили *экструдеры* (червячные прессы), которые позволяют осуществлять непрерывный процесс наложения изоляции и выпускать кабельную продукцию практически неограниченной длины. Процесс такого непрерывного производства изоляции или оболочки называется *экструзией*, или выдавливанием, а сами прессы — экструдерами.

Наиболее широко путем экструзии перерабатываются полиэтилен, полипропилен, поливинилхлоридные пластикаты, некоторые виды фторопластов и различные резиновые смеси.

Одним из основных преимуществ переработки этих материалов является непрерывность процесса, а это в свою очередь открывает широкие возможности для автоматизации производственных процессов и совмещения процесса изолирования с другими операциями по изготовлению кабелей, такими, как волочение, скрутка и т.п.

На рис. 11.4 показаны внешний вид и принципиальная схема экструдера.

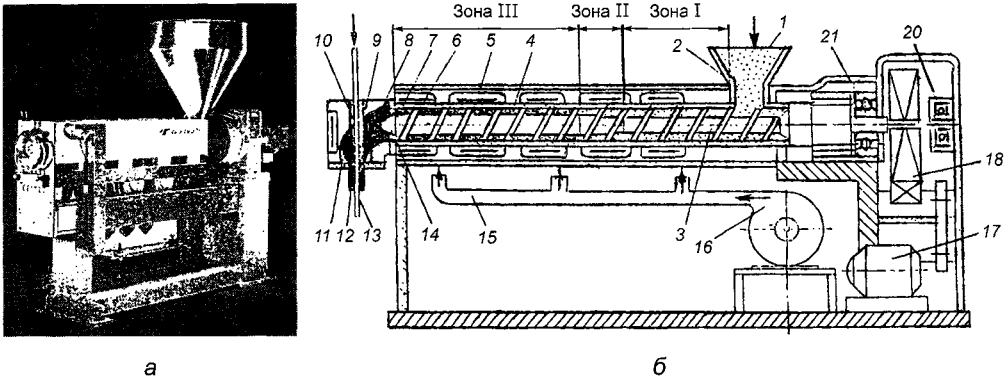


Рис. 11.4. Внешний вид (а) и схема (б) экструдера

Основная рабочая часть экструдера — рабочий цилиндр 5. Внутри его размещается плотно запрессованная втулка 4, выполненная из специальных легированных сталей, стойких к коррозии. Втулка обогревается электрическими нагревателями 6. Предусматривается также внешнее охлаждение цилиндра экструдера воздухом 15 от вентилятора 16 или водой.

Главнейший рабочий инструмент экструдера — червяк 3, расположенный внутри втулки цилиндра; приводится во вращение от электродвигателя 17 через редуктор 18. Червяк крепится в цилиндре экструдера консольно в подшипниках 20, 21, рассчитанных на значительные осевые нагрузки, и имеет винтовую спиральную нарезку, расположенную на рабочей части червяка. В зависимости от вида перерабатываемого материала рабочая длина червяка в 4–25 раз превышает его диаметр.

Перерабатываемый материал 2 в виде гранул периодически или непрерывно подается специальным устройством в загрузочную воронку 1 экструдера. Вращающийся червяк за счет винтовой нарезки захватывает загруженный материал и перемещает его по направлению к зонам II и III экструдера. За счет механических усилий, действующих на материал в винтовом

канале нарезки червяка, и за счет теплоты, поступающей от нагревателей цилиндра, гранулы полимера нагреваются и постепенно материал размягчается. Объем витков на входе червяка (зона I или зона загрузки) больше, чем на выходе в зоне III — дозирующей зоне, или зоне выдавливания. Отношение этих объемов называется *компрессией*, или степенью сжатия. Обычно компрессия в червяках для переработки пластмасс осуществляется за счет уменьшения глубины нарезки при неизменном по всей длине ее шаге. Как правило, это уменьшение глубины нарезки происходит в зоне II, именуемой *зоной сжатия*.

В зоне загрузки материал находится в виде гранул, в конце этой зоны и в зоне сжатия наблюдаются уже две фазы состояния полимера — частично размягченные, но еще не расплавленные гранулы и расплав полимера. В зоне дозирования полимер уже расплавлен и полностью заполняет винтовой канал червяка.

За счет винтовой нарезки вращающегося червяка создается мощное усилие, которое выдавливает расплав полимера из цилиндра экструдера в головку 9, где расположен формирующий инструмент (дорн 10 и матрица 11), обеспечивающий наложение заданного слоя 12 изоляции на токопроводящую жилу.

Для повышения качества изоляции, давления в головке, осуществления фильтрации расплава полимера между цилиндром и головкой экструдера размещается пакет металлических сеток 7 и решетка 8.

Следует иметь в виду, что важное значение имеет правильно подобранный температурный режим нагрева зон цилиндра, головки и матрицы. Весьма существенным для эффективной работы экструдера является недопустимость перегрева червяка, особенно загрузочной зоны. Для этого внутри червяка имеется канал для трубы, в которую подается циркулирующая охлаждающая вода.

Процессы, происходящие в экструдере весьма сложны и не всегда поддаются строгому математическому описанию. В разных зонах экструдера полимер находится в разных состояниях, поэтому для объяснения причин его перемещения в цилиндре экструдера используются различные физические модели. Рассмотрим некоторые из них.

Перемещение материала в загрузочной зоне экструдера. В загрузочной зоне экструдера происходит транспортирование сыпучего или пластичного материала, заполняющего винтовую нарезку вращающегося червяка.

Наиболее понятное объяснение перемещения материала вдоль оси винтового устройства можно получить, если сравнить его с перемещением гайки по вращающемуся винту (рис. 11.5).

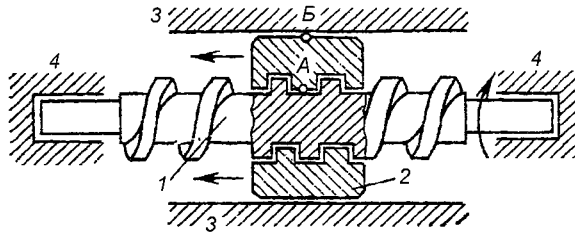


Рис. 11.5. Схема перемещения гайки по вращающемуся винту

Материал, заполняющий спиральный канал нарезки червяка, аналогичен гайке 2, расположенной на винте 1. Чтобы этот материал перемещался, например, влево при вращении червяка, необходимо, чтобы червяк проскальзывал относительно этого материала, а стенки цилиндра 3 удерживали этот материал от вращения вместе с червяком

Коэффициент трения полимера по стали существенно зависит от температуры (рис. 11.6).

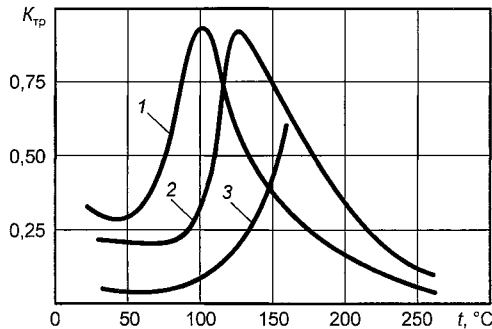


Рис. 11.6. Зависимость коэффициента трения полимеров по стали от температуры:
1 — полиэтилен низкой плотности; 2 — полиэтилен высокой плотности;
3 — поливинилхлоридный пластикат

Охлаждая, например, червяк, и нагревая стенку цилиндра, можно обеспечить минимальный коэффициент трения между полимером и червяком (см. точка А, рис. 11.5) и максимальный между полимером и поверхностью цилиндра (точка Б).

В загрузочной зоне экструдера происходит захватывание материала вращающимся червяком, частичное его перемешивание и перемещение по направлению к головке. Одновременно из-за принудительного обогрева и сил внутреннего трения материал постепенно переходит в состояние расплава.

В последующем в зоне сжатия происходит уплотнение материала с окончательным заполнением всего объема нарезки расплавленным полимером.

Таким образом, в дозирующей или выходной зоне в спиральном канале находится уже вязкая жидкость — расплав полимера, перемещение которой подчиняется другим закономерностям, а именно: вынужденному течению в канале червяка под действием выдавливающего усилия, создаваемого зонами загрузки и сжатия.

Течение расплава полимера в дозирующей зоне экструдера. При рассмотрении течения расплава полимера в канале червяка в дозирующей зоне экструдера необходимо учитывать наличие так называемого *противодавления*. Эта величина характеризуется разностью давлений, существующих в начале нарезки червяка, т.е. в начале зоны загрузки, и в конце нарезки червяка, т.е. в конце дозирующей зоны или в головке экструдера.

Перерабатываемый материал, перемещаясь внутри цилиндра экструдера по направлению к головке, испытывает сопротивление своему продвижению за счет действия различных сил (трения о поверхности червяка и стенки цилиндра, сопротивления истечению расплава, оказываемого различными участками головки и т.д.). Все это приводит к тому, что давление в расплаве в конце цилиндра и на входе в головку в десятки раз превышает давление в зоне загрузки, которое равно атмосферному. Наличие компрессии экструдера также способствует увеличению давления. Ввиду того, что давление увеличивается по мере продвижения материала в цилиндре к головке и как бы препятствует продвижению материала, оно называется *противодавлением*.

Существуют два фактора влияния противодавления.

1. Отрицательный. Уменьшается выход материала и, как следствие, объемная производительность экструдера.
2. Положительный. Способствует уплотнению материала, созданию гомогенного потока расплава в головке, что определяет в конечном итоге высокое качество производимой в экструдере изоляции.

Поэтому часто принимают специальные меры для увеличения противодавления (или, как говорят, давления) в экструдере за счет дополнительных сеток, специальных решеток и т.п.

Классификация экструдеров. В зависимости от взаимного положения центральных осей червяка и токопроводящей жилы или заготовки под оболочку, проходящих через головку, различают экструдеры прямоточные, с прямоугольной и косоугольной головками (рис. 11.7).

В кабельной промышленности наиболее широко применяются прямоугольные головки, которые удобны в эксплуатации, легко выполняются откидными, что облегчает смену формирующего инструмента, фильтрующих сеток и решеток, чистку червяка и головки.

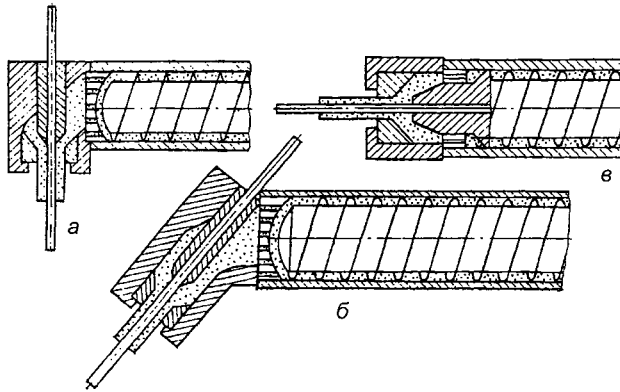


Рис. 11.7. Упрощенные схемы экструдеров с прямоугольной (а), косоугольной (б) и прямоточной (в) головками

Ось косоугольной головки расположена под углом $40\text{--}60^\circ$ к оси червяка, что выравнивает путь расплава полимера, поступающего из цилиндра экструдера в зону формирующего инструмента. В этом ее некоторое преимущество перед прямоугольной головкой, в которой поток испытывает поворот на 90° , что затрудняет центровку изоляции на жиле (оболочки на сердечнике). Однако, чтобы выполнить косоугольную головку откидной, приходится увеличивать ее объем, в том числе и объем каналов прохождения расплава. Это связано с возможностью образования так называемых «мертвых зон» в головке, в которых скорость полимера близка к нулю, что, в свою очередь, приводит к перегреву и разложению полимера и получению недоброкачественной изоляции.

Прямоточные головки в кабельной промышленности практически не применяются, а используются в тех экструдерах, где нет необходимости во внутреннем отверстии дорна для прохождения жилы, например, при экструзии полимерных пленок, нитей и т.п.

Для одновременного наложения двух или трех слоев на кабельную заготовку используются сдвоенные или строенные экструдеры (рис. 11.8).

В этих агрегатах, как правило, различные материалы последовательно накладываются в одной общей головке. До поступления в общую головку материал каждого слоя перерабатывается в отдельном экструдере, совместная работа которых синхронизирована.

В кабельной промышленности при производстве кабелей связи экструдеры для двух- и трехслойного наложения изоляции применяют для изготовления изоляции типа пленко-пористой и пленко-пористой пленочной, получаемах

методами химического и физического вспенивания соответственно. Для наложения такой изоляции разработаны новые схемы, принципиально не отличающиеся от схем описанных экструдеров, но имеющие другую геометрию основных рабочих органов — червяка и рабочей втулки.

Формующий инструмент и технологические параметры экструзии

а) **Схемы взаимного расположения дорна и матрицы.** На производительность экструдера и качество выпускаемой кабельной продукции существенное влияние оказывают формующий инструмент (дорн, матрица), в котором непосредственно формируются расплав полимера в цилиндрический слой изоляции, а также такие технологические параметры, характеризующие процесс экструзии, как геометрические размеры червяка и цилиндра экструдера, частота вращения червяка, температурный режим в цилиндре и головке, скорость прохождения жилы (сердечника) через головку экструдера.

В зависимости от взаимного расположения дорна и матрицы (рис. 11.9) меняется плотность наложения изоляции на токопроводящую жилу (сердечник) или, как обычно говорят, степень обжатия, а также производительность экструдера.

Наиболее часто используется расположение формующего инструмента, соответствующее рис. 11.9, а. При этом наблюдается наиболее плотное наложение изоляции. При расположении, соответствующем рис. 11.9, б, наоборот, происходит свободное выпрессовывание слоя изоляции, который накладывается на жилу без обжатия в виде трубки. Расположение в соответствии со схемой на рис. 11.9, в является промежуточным случаем — наложение изоляции с малым обжатием.

Высокая степень обжатия применяется при изготовлении изоляции кабелей, особенно рассчитанных на высокое напряжение, для которых недопус-

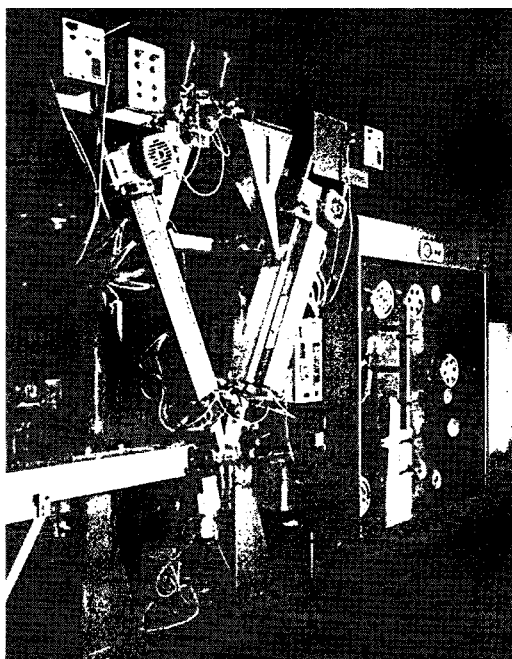


Рис. 11.8. Внешний вид трехзвенного экструдера для производства пленко-пористой пленочной изоляции токопроводящей жилы

тимо наличие воздушных включений у поверхности жилы. Если наличие воздушных включений не опасно, формирующий инструмент может располагаться по схеме, обеспечивающей малое обжатие (см. рис. 11.9, в). Свободное наложение слоя полимера обычно применяется при наложении пластмассовых оболочек, а также при наложении изоляции с так называемой *вытяжкой*, или с использованием вакуумирования дорна.

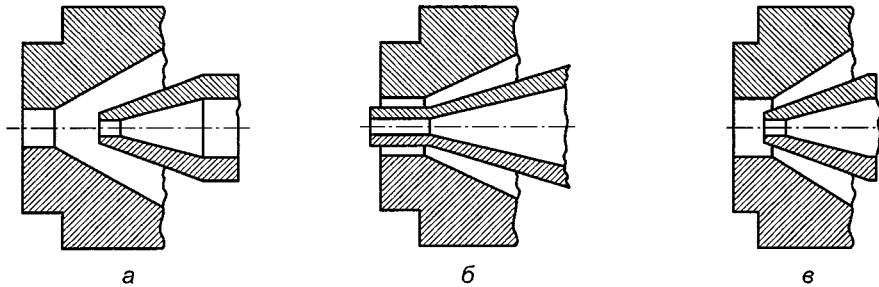


Рис. 11.9. Схема взаимного расположения дорна и матрицы:
 а — плотное наложение изоляции (с обжатием); б — свободное наложение изоляции (трубкой);
 в — наложение изоляции с малым обжатием

Наложение изоляции с вытяжкой происходит в том случае, когда токопроводящая жила движется через головку экструдера быстрее, чем выпрессовывается слой полимера. При этом происходит вытягивание полимера движущейся жилой и уменьшение радиальной толщины изоляции. Это ведет к увеличению линейной скорости, а также требует большего радиального зазора между дорном и цилиндрической частью матрицы. При вакуумировании дорна в его внутреннем отверстии создается разрежение за счет подключения вакуумного насоса через специальное приспособление. За счет разрежения слой изоляции плотно облегает жилу.

б) Влияние взаимного расположения дорна и матрицы (рис. 11.10). При увеличении расстояния a между дорном и цилиндрической частью матрицы не только увеличивается степень обжатия, но и несколько увеличивается производительность. Это объясняется тем, что увеличиваются конусный кольцевой зазор между дорном и матрицей и соответственно пропускная способность головки.

Слишком большое расстояние между дорном и матрицей может привести к обрыву токопроводящей жилы, а также способствует ухудшению центровки жилы в цилиндрической части матрицы. Обычно величина a при плотном наложении изоляции принимается не менее удвоенной радиальной толщины накладываемого слоя изоляции.

Диаметр цилиндрической части матрицы D_M определяет наружный диаметр выпрессовываемого слоя полимера, если только прессование не ведется с вытяжкой $D_M \approx D_{из}$. Однако следует учитывать, что ряд материалов после выхода из головки экструдера и последующего охлаждения меняет свои размеры. Так, полиэтиленовая изоляция в процессе охлаждения имеет усадку. Поэтому диаметр матрицы D_M берется несколько больше, чем диаметр изоляции $D_{из}$. Это увеличение достигает 10% и зависит как от диаметра, так и от толщины слоя изоляции. При выпрессовывании изоляции из ПВХ пластиката диаметр матрицы принимают равным диаметру изоляции.

Длина цилиндрической части матрицы L_M оказывает весьма существенное влияние как на производительность экструдера, так и на качество накладываемого слоя изоляции. На данном участке формируется слой изоляции, поэтому увеличение его длины способствует более стабильному течению потока расплава в данной зоне и, следовательно, более качественной изоляции. Но с увеличением L_M пропорционально увеличивается сопротивление данного участка, т.е. уменьшается пропускная способность головки и, как следствие, производительность экструдера. На практике L_M принимают не более диаметра матрицы, а при наложении полиэтиленовой или ПВХ изоляции в пределах 1...8 мм.

В ряде случаев применяют двухконусные матрицы (рис. 11.11, в).

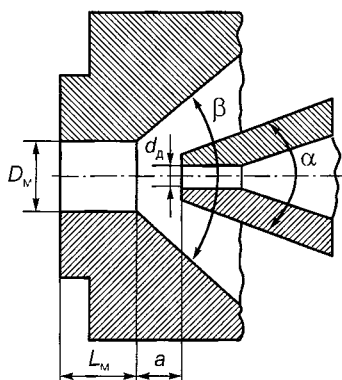
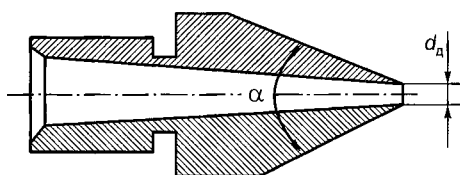
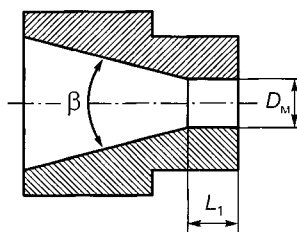


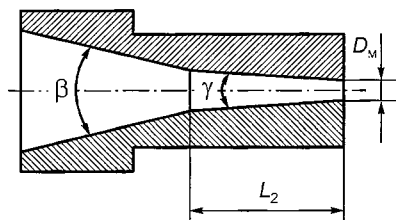
Рис. 11.10. Схема расположения дорна и матрицы



а



б



в

Рис. 11.11. Формующий инструмент для наложения полиэтиленовой изоляции:

а — дорн; б — матрица;
в — двухконусная матрица

Они имеют значительно большую длину по сравнению с обычными. Угол γ выходного конуса обычно небольшой (несколько градусов), второй конус имеет значительно больший угол β . Использование этих матриц обеспечивает уплотнение изоляции и большую ее стабильность. Такие матрицы применяются в ряде случаев при наложении изоляции большой радиальной толщины за один проход и при наложении тонкослойной изоляции. В последнем случае за счет увеличения длины матрицы увеличивается сопротивление головки, что соответствует повышению стабильности процесса изолирования.

Диаметр внутреннего выходного отверстия дорна d_d приблизительно равен диаметру токопроводящих жил (ТПЖ). Он выбирается больше на 0,05...0,20 мм для обеспечения свободного прохождения жилы. При заметном увеличении зазора между жилой и внутренней поверхностью выходного отверстия дорна жила может оборваться из-за проникновения в этот зазор находящегося под избыточным давлением полимера.

Технологический инструмент (формирующий) — дорн и матрица — должен быть термообработан и, как правило, хромирован.

При наложении изоляции со скоростью более 200 м/мин дорны обязательно должны иметь наконечники из твердых сплавов или алмазов.

в) Влияние температуры. Температура в зонах цилиндра и головки экструдера, а также в охлаждающем устройстве оказывает большое влияние на качество изоляции и производительность экструдера.

Температуры стенки цилиндра и поверхности червяка в загрузочной зоне выбираются такими, чтобы обеспечивался наибольший коэффициент трения между полимером и стенкой цилиндра и наименьший — между полимером и поверхностью червяка (см. рис. 11.6).

В дозирующей зоне важное значение имеет однородность свойств полимера по всему объему канала нарезки червяка, что достигается равномерным его нагревом. Этим обеспечивается высокое качество изоляции, выражающееся в однородности свойств по толщине слоя изоляции.

Наибольшую производительность можно получить в том случае, когда червяк имеет максимально высокую температуру. Однако следует иметь в виду, что при этом ухудшается гомогенность расплава, а также имеется опасность чрезмерного перегрева полимера, приводящего к его разложению.

В свою очередь, уменьшение температуры как цилиндра, так и червяка из-за увеличения вязкости полимера обеспечивает более стабильную работу экструдера (т.е. меньшие колебания производительности, а следовательно, и размеров кабеля при отклонении от нормы технологических параметров). Поэтому для стабильности размеров изготавливаемых кабелей применяют охлаждение червяка и особенно его дозирующей зоны.

Для особой стабильности технологического процесса увеличивают число зон обогрева цилиндра до 4–5.

В экструдерах для получения пленко-пористой пленочной изоляции методом физического вспенивания (технология *EXTRUCCELL*) в центр экструзионного цилиндра вводится газ (фреон, азот) из станции закачки газа через инжекторы. Необходимая степень вспенивания регулируется аппаратурой станции закачки. Экструзионная группа состоит из основного экструдера (например, NMB 60-30D), в комплекте со станцией закачки газа. Два экструдера (например, NMA 30-24D) накладывают внутренний и наружный слой изоляции постоянной толщины.

г) Комплект технологической оснастки. Головка экструдера комплектуется формующим инструментом с жесткой или регулируемой центровкой. Дорн имеет вставку из синтетических или натуральных алмазов. Поверхность, соприкасающуюся с пластмассами, рекомендуется хромировать толщиной 0,025...0,051 мм. После хромирования необходима полировка поверхностей.

При наложении изоляции на жилу диаметром менее 0,5 мм диаметр дорна принимается равным $d_{ж} + (0,01...0,02)$ мм, а более 0,5 мм — $d_{ж} + (0,05...0,15)$ мм, где $d_{ж}$ — диаметр жилы.

При наложении изоляции на жилу диаметром до 2 мм $D_{м} = (1,0...1,1)d_{из}$.

В головке экструдера устанавливается не менее трех стальных и латунных фильтрующих сеток с номерами 056, 045, 016. Фильтрующие сетки меняют по мере необходимости, но не реже раза в три смены.

д) Охлаждение изолированной жилы. После выхода из головки экструдера токопроводящая жила с нанесенным на нее слоем изоляции, находящимся в состоянии расплава при температуре около 200°C, должна охладиться до температуры, при которой возможен ее прием на тяговое устройство. Кроме того, при изготовлении пленко-пористой изоляции методом химического вспенивания весьма важен именно момент начала охлаждения изоляции ТПЖ, так как при этом прекращается образование пузырьков газа в изоляции жилы, т.е. наступает момент окончания «вспенивания» полиэтилена.

Момент окончания вспенивания полиэтилена при изготовлении пленко-пористой изоляции жилы регулируется специальным автоматическим устройством с обратной связью. В основе способа регулирования момента окончания вспенивания полиэтилена лежит «отслеживание» задаваемой величины «водной» емкости жилы. Эта емкость образуется конденсатором, в котором в качестве одной из обкладок используется вода. Диэлектрическая проницаемость ϵ изоляции токопроводящей жилы (другой обкладки) такого конденсатора и является в итоге регулируемой величиной. Момент окончания вспенивания,

а следовательно, величины «водной» емкости, регулируется перемещением подвижной части ванны охлаждения (каретки) с соплом подачи струи охлаждающей воды на жилу.

Материалы изоляции, кроме того, необходимо охладить, по крайней мере, до 60...70°C, чтобы исключить возможность деформации нанесенного слоя изоляции при прохождении через тяговое устройство.

Если поступающий в охлаждающее устройство слой полиэтиленовой изоляции охлаждается сразу холодной водой, то наружные слои изоляции быстро остывают и уменьшают свои размеры до определенного значения. Из-за низкой теплопроводности внутренние слои изоляции еще не успевают охладиться и будут находиться в состоянии расплава. Постепенно будут охлаждаться и эти слои, существенно уменьшая свой объем. Однако это будет происходить при уже охлажденных наружных слоях, а поэтому во внутренних слоях изоляции и у поверхности жилы возможны появления воздушных пустот. Данные явления более ярко выражены при больших радиальных толщинах изоляции. Во избежание указанных явлений проводят постепенное (ступенчатое) охлаждение полиэтиленовой изоляции.

Однако при малых толщинах изоляции (менее 0,7 мм) из-за незначительного перспада температур по толщине полиэтиленовую изоляцию можно охлаждать холодной водой.

Изоляция из ПВХ сразу охлаждается холодной водой. Это объясняется небольшим температурным коэффициентом объемного расширения материала.

Охлаждение изоляции жилы происходит в специальной многоступенчатой ванне, в разных точках которой по длине имеются устройства для подачи воды под давлением. Современные ванны имеют несколько коробов, вставляемых один в другой, и систему дренажных отверстий и труб для удаления отработанной воды. Размеры ванны и температура воды в ней зависят от размеров изолированной жилы, скорости ее перемещения и материала изоляции. Ванны имеют систему направляющих колес, барабанов и компенсаторов для стабилизации процесса движения изолированной жилы и уменьшения «вытяжки» жилы. В современных экструзионных линиях, таких как, например, TEL 35 E, ванны имеют подвижную секцию (каретку) с соплом для подачи воды, управление движением которой осуществляет система автоматического регулирования процесса окончания вспенивания полиэтилена при изготовлении пленко-пористых изоляций методами физического и химического вспенивания. Кроме того, линия изолирования методом физического вспенивания оборудована устройством для регулировки диаметра изоляции жилы. Способ управления величиной диаметра изоляции базируется на отслеживании задаваемого диаметра изоляции изменением числа оборотов червяка основного экструдера (система емкость–диаметр).

Вода, подаваемая в ванну, поступает из закрытой системы обеспечения водой, состоящей из накопителей с фильтрами, градирни для охлаждения и насосов подачи воды.

е) Прием готовой изолированной жилы. После ванны размещается устройство для удаления влаги с поверхности изоляции путем обдува ее струей воздуха под давлением около 0,2 МПа.

Для контроля и регулирования размеров накладываемой изоляции в линии применяются измерители диаметра, которые могут быть контактного или бесконтактного типа. Контактный измеритель диаметра размещают после ванны охлаждения. Он представляет собой два ролика, между которыми проходит изолированная жила. В случае отклонения ее диаметра от номинального размера один из роликов — подвижный — перемещается. Данное перемещение используется для автоматического регулирования диаметра. Механическое перемещение ролика преобразуется в электрический сигнал, который используется для увеличения или уменьшения частоты вращения тягового механизма линии. При высоких линейных скоростях изолирования и сравнительно больших размерах охлаждающей ванны за счет инерционности системы автоматического регулирования большие участки готовой продукции могут выходить за пределы нормы. Поэтому желательно размещать измерители диаметра непосредственно у выхода из головки экструдера. Так как материал изоляции в этом месте находится в состоянии расплава, то применение контактных датчиков исключено. Поэтому здесь используются бесконтактные измерители диаметра, которые могут быть, например, фотоэлектрического типа.

Линии изолирования укомплектовываются прибором сухого испытания со счетчиком для регистрации числа пробоев изоляции, а также приспособлением для измерения фактической длины изолированной жилы и измерителем эксцентриситета изоляции относительно ТПЖ.

Приемные устройства для готовой изолированной жилы могут быть самой различной конструкции. Но при применении современных высокоскоростных линий изолирования наиболее эффективным устройством является сдвоенный приемник изолированной жилы (рис. 11.12).

Автоматический сдвоенный приемник осуществляет непрерывный прием изолированной жилы на катушки диаметром 510 или 630 мм, которые затем можно устанавливать без перемотки на линии скрутки групп и элементарного пучка (сердечника). Наличие чувствительного компенсатора и совершенного привода приемника позволяет существенно снизить натяжение изолированной жилы при намотке и осуществлять автоматический перевод жилы с одной катушки на другую. Приемник снабжен счетчиком на заданную дли-

ну, который контролирует постоянство длины изолированной жилы на каждой снимаемой катушке. Система управления приемником может обеспечить работу в ручном режиме. Это позволяет выполнять запуск или изменять последовательность работы приемника на любой стадии технологического процесса. Кроме того, система управления автоматического сдвоенного приемника обеспечивает стыковку приемника с роботизированным складом изолированной жилы.

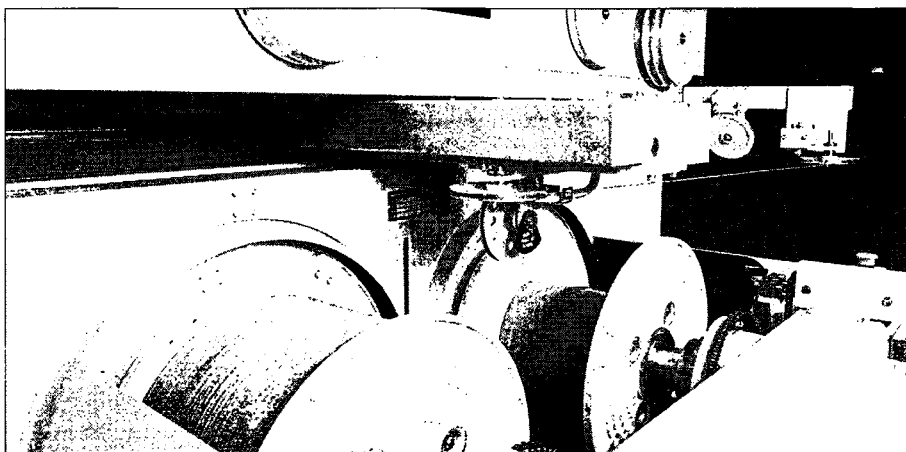


Рис. 11.12. Сдвоенный приемник изолированной жилы

На некоторых заводах установлены роботизированные склады изолированной жилы, образующие совместно с линиями скрутки пар и элементарных пучков единую технологическую производственную цепочку. Основным рабочим органом роботизированного склада является электромеханический манипулятор (робот), управляемый специальной программой. Манипулятор может перемещаться во всех возможных плоскостях в зоне склада и с высокой точностью позиционировать в пространстве свой рабочий орган — захваты, удерживающие катушку с изолированной жилой.

Роботизированный склад позволяет:

- автоматизировать процесс приема и постановки катушек с изолированной жилой на склад;
- дифференцировать поступающие на склад катушки по размерам ТПЖ, типу изоляции, количеству намотанной на катушку изолированной жилы, а также по наличию брака. Вся информация о продукции, установленной и хранящейся на складе, содержится в памяти компьютера;

- подбирать необходимый комплект катушек для дальнейшей установки на отдатчики линии скрутки пар и элементарного пучка (сердечника) кабеля;
- осуществлять полуавтоматический выбор (по требованию оператора), подбор и установку катушек на склад или на отдатчики линии скрутки пар и элементарного пучка (сердечника);
- исключить ошибки оператора при подборе комплекта катушек для линий скрутки и практически осуществлять принцип «одна линия изолирования—одна линия скрутки—один кабель»
- экономить полезную производственную площадь предприятия, так как роботизированный склад изолированной жилы может быть размещен на нескольких уровнях по высоте;
- существенно облегчать условия труда операторов линии изолирования и линий скрутки пар и пучков.

Роботизированные склады нашли применение на кабельных заводах, например, ЗАО «Нева-кабель», ЗАО «Самарская кабельная компания».

11.5. Скрутка КШД

Принципы действия крутильных машин

К наиболее распространенным технологическим процессам производства КШД относится *скрутка*. Из изолированных жил скручиваются группы (пары, четверки), элементарные пучки либо сердечники кабелей.

Скрутка — это процесс объединения отдельных элементов кабеля (изолированных жил, групп, пучков), при котором каждый из них располагается по винтовой линии вокруг центральных (одного или нескольких) элементов. Каждый периферийный элемент скрутки в пространстве образует спираль. Основная цель скрутки — придать изделию (кабелю или его элементу) устойчивую конструкцию и гибкость.

Скрутка позволяет избежать нежелательных деформаций элементов кабельной конструкции при изгибе, так как изменение длины каждого элемента при изгибе компенсируется на длине одного витка.

Скрутка осуществляется в результате сочетания двух движений: прямолинейного (поступательного) и вращательного. При этом вращение может осуществляться как по часовой стрелке, так и против нее. Скрутка называется *левой*, когда каждый элемент скрутки, если смотреть на него по направлению оси, идет справа вверх налево, и *правой* при траектории элемента слева вверх направо (рис. 11.13).

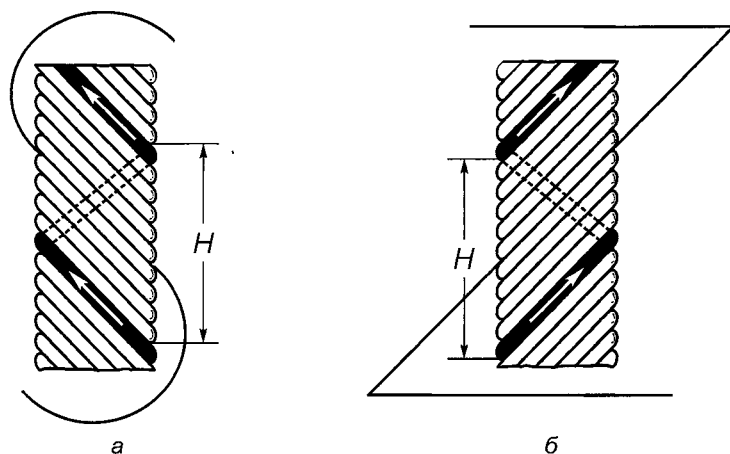


Рис. 11.13. Направления скрутки:
а — левая скрутка; б — правая скрутка

Скрутка осуществляется на крутильных машинах, которые отличаются исключительным многообразием конструкций и весьма широким диапазоном их габаритов — от долей метра до нескольких метров диаметром и десятков метров в длину. Следует отметить, что необходимость использования вращательного движения обуславливает ограниченную скорость процесса скрутки по сравнению с современными процессами, основанными только на прямолинейном поступательном движении заготовки-изделия (например, экструдированием) и, следовательно, не позволяет резко увеличить производительность крутильных машин, которая так необходима для интенсификации всего кабельного производства.

Крутильная машина содержит четыре основных узла:

- отдающее устройство;
- тягловое устройство;
- приемное устройство;
- рабочий механизм (у большинства машин совмещен либо с отдающим, либо с приемным устройством).

Для того чтобы скрутить между собой два отрезка изолированной жилы (пучка) и т.п., их следует вращать вокруг общей оси либо с одного конца, либо с другого, одновременно придавая им прямолинейное перемещение в ту или другую сторону. Скрутка происходит в результате воздействия на вращающееся отдающее или приемное устройство пары сил, действующей в плоскости, перпендикулярной оси скручиваемого изделия (рис. 11.14).

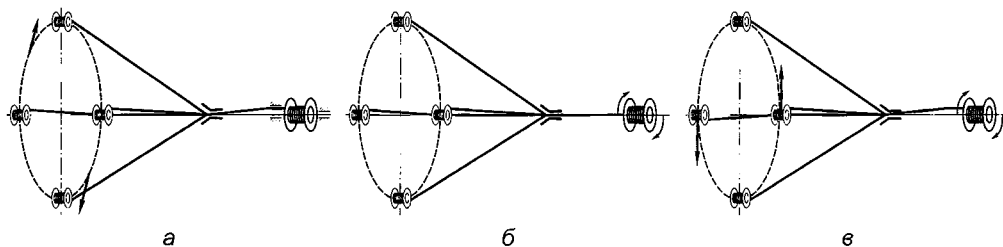


Рис. 11.14. Схема способов однонаправленной скрутки:

a — при вращении отдающего устройства; *б* — при вращении приемного устройства;
в — при вращении отдающего и приемного устройств в разные стороны (двойная скрутка)

В первом случае (рис. 11.14, *a*) отдающее устройство вращается по часовой стрелке, если смотреть по направлению движения, а приемное устройство неподвижно. Изделие получает левую скрутку. Во втором случае (рис. 11.14, *б*) приемное устройство вращается по часовой стрелке при неподвижном отдающем. Изделие получает правую скрутку. Возможно воздействовать парой сил одновременно на отдающее и приемное устройства. Если при этом оба устройства вращаются с одинаковой частотой, но в одну сторону, то скрутки изделия очевидно не произойдет, ибо левая и правая скрутки взаимно аннулируются. Если же отдающее и приемное устройства вращаются в разные стороны, то на каждом участке образуется двойная скрутка (рис. 11.14, *в*).

Таким образом, при вращении только одного из крутильных устройств за каждый его оборот происходит одно закручивание изделия, т.е. образуется один виток каждого из элементов скрутки. При вращении обоих устройств в разные стороны с одинаковой частотой за один их оборот происходят два закручивания изделия, т.е. образуются два витка каждого из элементов скрутки.

Во всех перечисленных вариантах крутильное устройство совмещалось либо с отдающим, либо с приемным устройством, либо одновременно с обоими. При этом достигалось действительное результирующее кручение изделия.

В новых конструкциях машин используется не совмещенный, а самостоятельный крутильный узел, расположенный между отдающим и приемным устройствами. При этом в зависимости от принципа его действия возможны или действительная, или, так называемая *мнимая скрутка*.

Мнимая скрутка происходит в том случае, если пару сил приложить к изделию на участке между зажимами «а» и «б», в которых оно закреплено (рис. 11.15, а), или через которые оно может перемещаться. Если смотреть от плоскости скрутки вдоль изделия на каждый из зажимов, то окажется, что на участках «аб» и «бв» получаются разные направления скрутки при равном числе образовавшихся витков. Если изделие закреплено в зажимах «а» и «б», то после прекращения действия пары сил оно раскрутится. При перемещении изделия, выходит ли оно из зажима «а», двигаясь справа налево, или из зажима «в», двигаясь слева направо, оно окажется нескрученным, так как в точке «б» направление скрутки изменяется на противоположное.

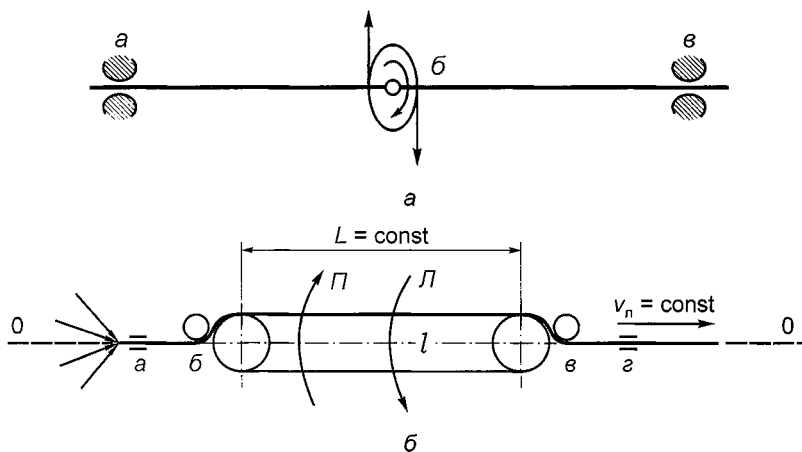


Рис. 11.15. Схема процессов мнимой (а) и действительной (б) разнонаправленной скрутки

Однако оказалось возможным использовать принцип мнимого кручения для получения скрученного изделия, выходящего через один из зажимов, например в. Для этого между неподвижными зажимами помещают реверсивно вращающееся крутильное устройство, в пределах $L = \text{const}$ которого может находиться определенная длина скручиваемого изделия $l = nL$, где n — число витков изделия на устройстве L . Подобное крутильное устройство поэтому называется *накопителем* (рис. 11.15, б).

Пусть накопитель вращается по часовой стрелке, тогда на участке «аб» скрутка будет правая; постепенно изделие с правой скруткой заполнит накопитель «бв» емкостью l . В момент, когда головная часть изделия выйдет из накопителя в точке «в», накопитель реверсируется и начинает вращаться против часовой стрелки. Изделие, проходящее участок «вз» и имеющее уже

правую скрутку, дополнительно закручивается по-прежнему в правую сторону (согласно вышеизложенным правилам). При указанном реверсировании накопителя направление скрутки на участке «*аб*» изменится на левое, и по мере выхода из накопителя изделия правой скрутки он заполняется изделием левой скрутки. Когда накопитель полностью заполнится изделием левой скрутки, он снова реверсируется и т.д. Таким образом, процесс может продолжаться непрерывно с образованием попеременно участков левой и правой (в обоих случаях двойной) скруток длиной l .

Машины, в которых вокруг оси изделий вращается отдающее или приемное устройство (или одновременно оба устройства, но в разные стороны), являются машинами *однонаправленной скрутки*. Такой тип машин охватывает практически подавляющее число конструктивных вариантов.

Машины, в которых отдающее и приемное устройства неподвижны, а вокруг оси скрутки вращается самостоятельный крутильный узел, являются машинами *разнонаправленной скрутки*. Часто их называют *машинами SZ-скрутки*, так как направление левой скрутки совпадает с направлением центральной части латинской буквы *S*, а правой скрутки — с направлением центральной части буквы *Z* (см. рис. 11.13).

Однонаправленную двойную скрутку можно получить и при такой схеме, когда при неизменном направлении вращения изделия реверсируется направление его прямолинейного поступательного движения. Если в схемах рис. 11.14 развернуть отдающее или приемное устройство на 180° , сделать их неподвижными, но вращать вокруг них с помощью легкой рамки скручиваемое изделие, то оно за каждый оборот рамки скрутится дважды. Рассмотрим схему на рис. 11.16, *а* при условии, что рамка вращается вокруг отдающего устройства против часовой стрелки, если смотреть по направлению от отдающего устройства к приемнику. Начальное направление движения изделия справа налево — от 1 до 2. Согласно второму правилу (по часовой стрелке вращается дальний, если смотреть по направлению движения изделия, его конец) на участке 1–2 изделие скручивается вначале в правом направлении. Двигаясь по рамке, в точке 3 оно изменяет свое направление на противоположное и теперь уже перемещается слева направо. На участке 5–6 вращается уже не дальний, а ближний конец изделия (по-прежнему следует смотреть в направлении его движения), но при этом уже не по часовой стрелке, а против нее. Тогда, согласно третьему правилу, на участке 5–6 изделие скручивается вторично и снова в правом направлении. За один оборот крутильной рамки происходит двойная скрутка изделия.

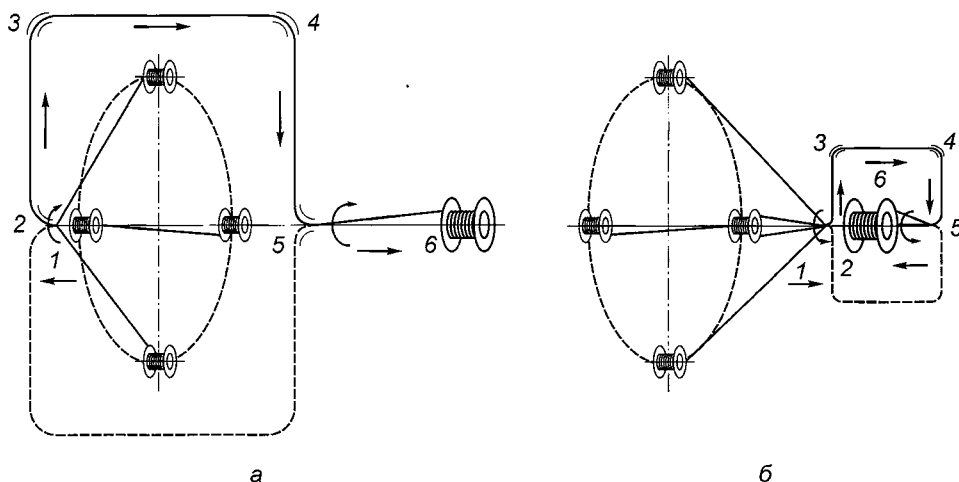


Рис. 11.16. Схема способов однонаправленной двойной скрутки при вращении крутильной рамки вокруг отдающего (а) или приемного (б) устройства

Аналогичен механизм действия схемы на рис. 11.16, б. Здесь сначала вращается в одном направлении дальний конец изделия, движущегося слева направо, а затем ближний конец (причем в противоположном направлении изделия, изменившего свое направление на обратное в точке 5).

В зависимости от постоянного направления вращения крутильной рамки — по часовой или против часовой стрелки — в каждой из схем осуществляется либо правая, либо левая двойная скрутка.

В зависимости от конструкции скручиваемого изделия применяют скрутку с откруткой или без открутки, соответственно этому выбирают и тип крутильных машин.

При скрутке без открутки (рис. 11.17, а) отдающие катушки неподвижно укреплены в крутильном устройстве и при его вращении за каждый оборот поворачиваются на 360° вокруг оси скручиваемого изделия.

Изолированные жилы, сходящиеся с отдающих катушек, получают такое же закручивание по отношению к оси скручиваемого изделия. В результате каждая жила, располагаясь вокруг сердечника по винтовой линии, ложится на него всегда одной и той же образующей, все время претерпевающей сжатие, так как она располагается ближе к оси скручиваемой жилы. При этом наружные слои жилы растягиваются.

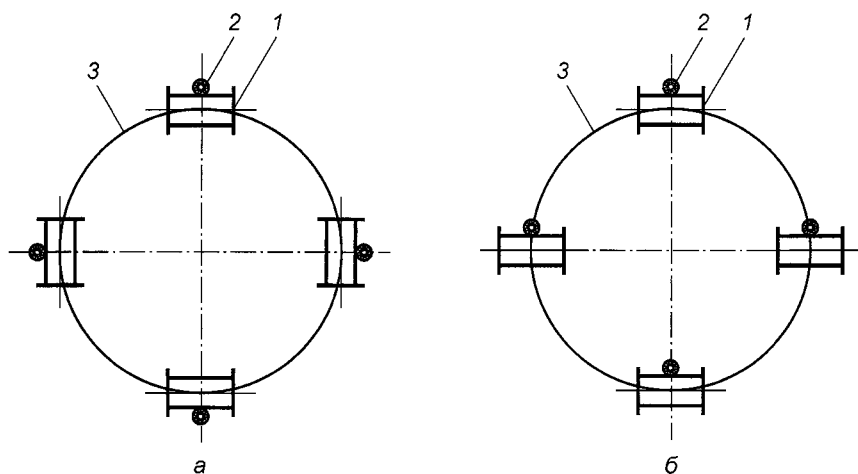


Рис. 11.17. Схема скрутки:
 а — без открутки; б — с откруткой; 1 — катушка; 2 — жила;
 3 — траектория движения отдающей катушки

Степень закрутки — величина не постоянная, а зависит от величины шага скрутки. При шагах скрутки, лежащих между нулем и бесконечностью, каждая жила претерпевает закручивание вокруг своей оси. При скрутке без открутки каждая жила закручивается вокруг своей оси и, кроме того, изгибается.

При скрутке с откруткой (рис. 11.17, б) отдающие катушки при вращении крутильного устройства за каждый его оборот с помощью механизма открутки поворачиваются также на один оборот в сторону, противоположную вращению крутильного устройства, так что оси катушек, перемещаясь по окружности, все время сохраняют положение, параллельное начальному. В этом случае скручиваемые жилы не получают деформации изгиба, являющегося основной причиной неустойчивости повива.

Все механизмы для осуществления открутки отдающих катушек или барабанов разделяются на две группы: шарнирного параллелограмма (или кривошипно-эксцентрикковые) и планетарные с зубчатыми колесами. Первые могут применяться только в машинах с вращающимися клетями, вторые — универсальны. В современных машинах открутка производится с применением специальных электродвигателей.

Технологические параметры процесса скрутки

Основной параметр, который характеризует процесс скрутки, — шаг скрутки. Напомним, что под *шагом скрутки* h понимается расстояние по длине скручиваемого изделия (группы, пучка кабельного сердечника), которое со-

ответствует одному полному обороту вокруг него любого из элементов скрутки, например, отдельной жилы, группы или пучка (см. рис. 11.13). При данном диаметре скручиваемого изделия шаг скрутки характеризует степень крутизны, с которой производится скрутка. Чем круче скрутка, тем меньше для изделия одного и того же диаметра ее шаг, и наоборот.

В технологической практике пользуются не абсолютной величиной шага скрутки, мм, а безразмерным отношением шага скрутки к диаметру изделия. Это отношение именуется *кратность шага* скрутки и обозначается m :

$$m = h/D.$$

Кратность шага скрутки, зависящая от диаметра скручиваемого изделия, дает более объективное и наглядное представление о степени крутизны скрутки, чем абсолютные значения шага скрутки, взятые безотносительно к размерам изделия.

Рассмотрим зависимость между шагом скрутки изделия h и основными параметрами, характеризующими работу крутильной машины: ее линейной скоростью $v_{л}$ и частотой вращения крутильного устройства $n_{\text{крут}}$. Согласно определению шаг скрутки равен длине изделия, прошедшего через машину за время t , в течение которого ее крутильное устройство совершит полный оборот, образуя при этом один спиральный виток элемента скрутки. Линейная скорость выражается в метрах в минуту, а частота вращения — в оборотах в минуту. Так как шаг скрутки принято выражать в миллиметрах, то искомая зависимость примет вид

$$h = v_{л} \cdot 1000/n_{\text{крут}}.$$

Модуль скрутки M характеризует число витков элементов скрутки, приходящиеся на единицу длины скрученного изделия. Модуль скрутки соответствует отношению числа оборотов, совершаемых вращающимся концом изделия в единицу времени $n_{\text{крут}}$, к его длине, прошедшей через крутильное устройство также в единицу времени, т.е. к линейной скорости машины $v_{л}$:

$$M = n_{\text{крут}}/v_{л}.$$

Согласно сделанным определениям модуль скрутки — величина, обратная шагу скрутки ($M = 1/h$). С учетом различия в единицах обеих величин (h — мм, M — м^{-1}) зависимость между ними выражается

$$M = 1000/h,$$

или

$$h = 1000/M.$$

Понятием модуля скрутки удобно пользоваться при рассмотрении различного рода машин разнонаправленной скрутки, а также машин многократной однонаправленной скрутки.

Машины однонаправленной скрутки

Машины однонаправленной скрутки при производстве КШД наиболее предпочтительны с точки зрения параметров влияния.

Различают четыре типа крутильных машин однонаправленной скрутки в зависимости от того, какой из узлов машины вращается относительно оси скрутки:

- 1 тип — с крутильно-отдающим устройством;
- 2 тип — с крутильно-приемным устройством;
- 3 тип — с рамкой, вращающейся вокруг отдающего устройства;
- 4 тип — с рамкой, вращающейся вокруг приемного устройства.

Рамочные машины для однонаправленной скрутки являются основным типом машин, применяемых для скрутки сердечников большинства КШД.

Всем рамочным машинам присущи два общих преимущества, принципиально отличающих их от машин с крутильно-несущим устройством.

1. *Быстроходность*, обусловленная отсутствием тяжелых вращающихся масс. Частота вращения относительно легкой «безинерционной» крутильной рамки ограничивается лишь ее конструктивной прочностью, качеством конструктивного исполнения и может достигать нескольких тысяч оборотов в минуту. Максимальная скорость современных линий при этом может достигать 130 м/мин и более.

2. *Способность производить двойную скрутку* изделия за один оборот крутильной рамки (см. рис. 11.16). Такая скрутка может быть осуществлена только при условии, что направления поступательного прямолинейного движения скручиваемого изделия при входе на рамку и сходе с нее взаимно противоположны. В машинах, в которых реверсирование движущегося по рамке изделия не происходит, за каждый оборот рамки осуществляется только одно кручение. В связи с вышеуказанным рамочные машины делятся на машины одинарной и двойной скрутки.

Наибольшее распространение в настоящее время получили рамочные машины, в которых рамка конструктивно выполнена в виде полых или сплошных трубчатых стержней, равномерно распределенных по окружности (с целью лучшей балансировки) и жестко связанных между собой (рис. 11.18).

В современных высокоскоростных крутильных рамочных машинах (рис. 11.19) скрутка пар осуществляется в так называемых модулях, рамки которых приводятся во вращение от общего приводного электродвигателя.

Выбор шагов скрутки каждой пары может осуществляться путем настройки ременной или зубчатой передачи вращения от вала двигателя на модуль. В машинах, осуществляющих скрутку пар для сердечников кабелей структурированных кабельных систем, каждый модуль оснащен датчиками линейной скорости движения пары (пучка) и угловой скорости вращения рамки. Эти

датчики позволяют оператору линии с помощью системы индикации и управления машиной следить за величиной и стабильностью шагов скрутки. Скрутка пучка в таких машинах осуществляется по схеме машины с крутильно-приемным устройством.

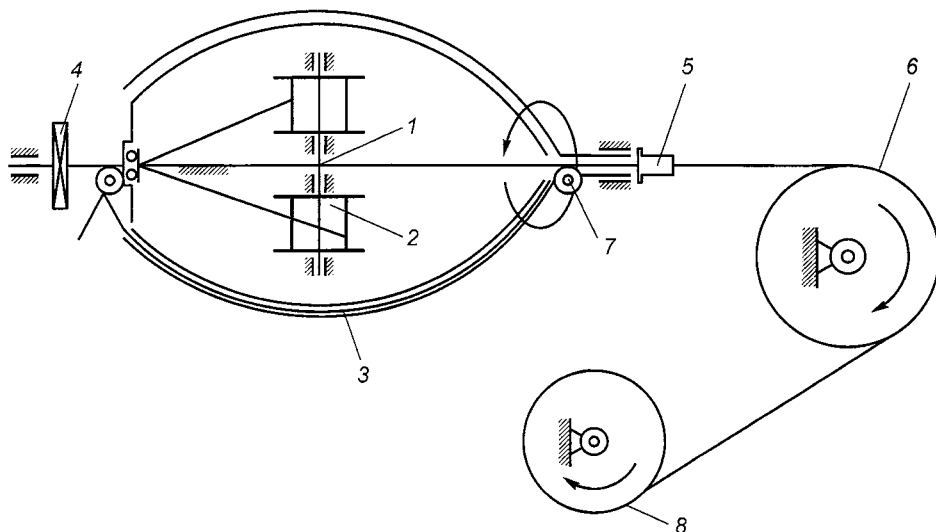


Рис. 11.18. Машина с крутильной рамкой, вращающейся вокруг отдающего устройства: 1 — отдающее устройство; 2 — отдающие катушки; 3 — крутильная рамка; 4 — приводной механизм; 5 — калибр; 6 — тяговое устройство; 7 — направляющие ролики; 8 — приемное устройство

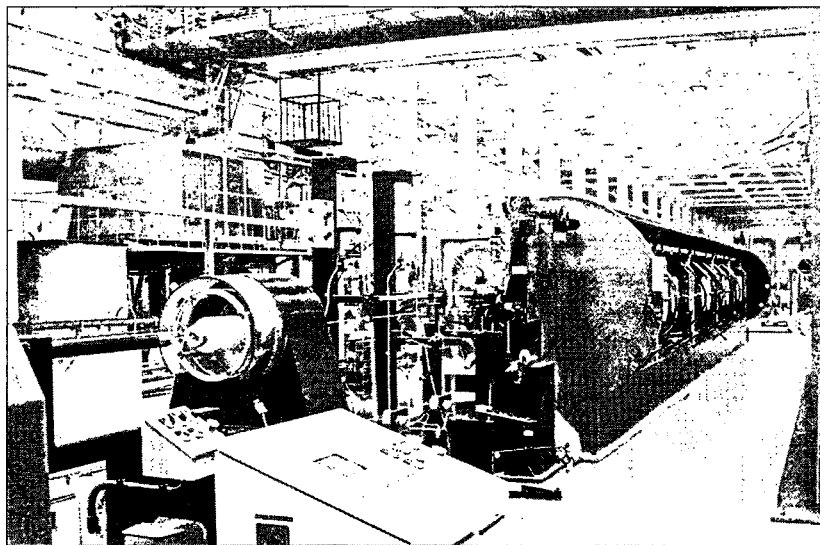


Рис. 11.19. Высокоскоростная крутильная рамочная машина

Машины с рамкой, вращающейся вокруг приемного устройства, показаны на рис. 11.20.

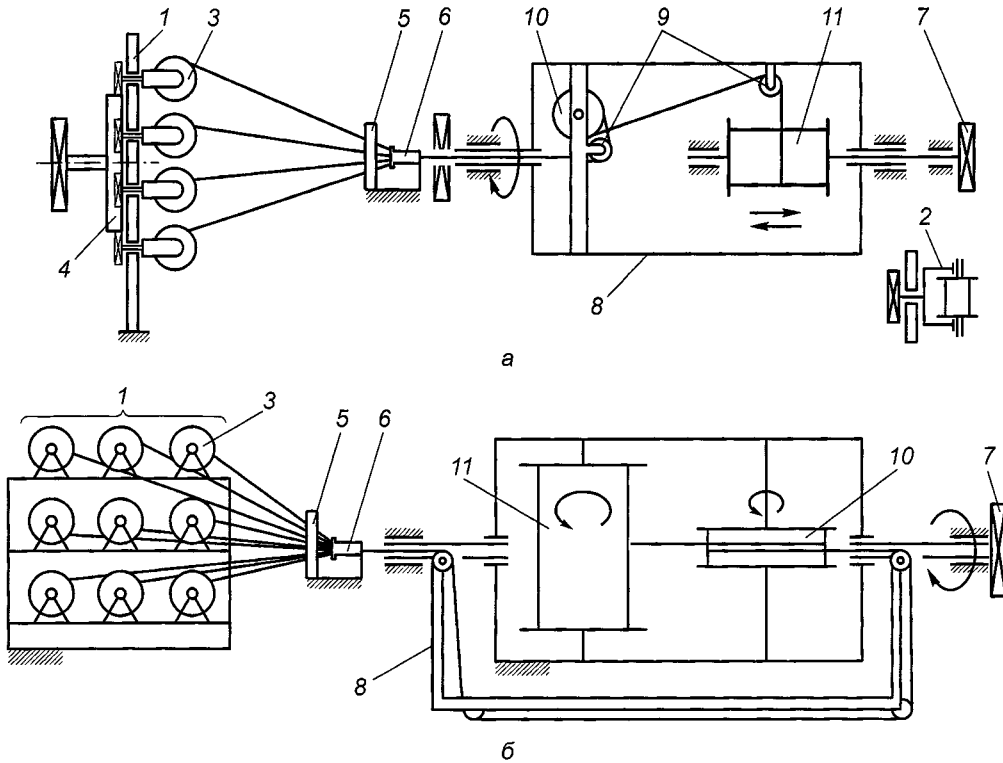


Рис. 11.20. Машины с рамкой, вращающейся вокруг приемного устройства:
 а — одинарной скрутки с откруткой; б — двойной скрутки без открутки;
 1 — отдающее устройство; 2 — люлька для отдающей катушки; 3 — отдающая катушка;
 4 — приспособление для открутки; 5 — распределительная розетка; 6 — калибр;
 7 — приводная шестерня; 8 — крутильная рамка; 9 — направляющие ролики;
 10 — тяговое устройство; 11 — приемное устройство

Отличие их от машин с крутильной рамкой, вращающейся вокруг отдающего устройства, состоит в том, что внутри крутильной рамки расположена только одна приемная катушка. Машины одинарной и двойной скрутки конструктивно отличаются тем, что в машинах одинарной скрутки тяговое устройство жестко связано с крутильной рамкой, которая вращается таким образом только вокруг приемного устройства (рис. 11.20, а). В машинах двойной скрутки рамка должна вращаться вокруг тягового и приемного устройств (рис. 11.20, б).

В машинах одинарной скрутки вращающийся конец скручиваемого изделия совершает один оборот вокруг оси скрутки за один оборот крутильного узла. В машинах двойной скрутки за каждый оборот крутильного узла скручиваемое изделие совершает два кручения вокруг оси скрутки. Таким образом, при одинаковых линейных скоростях процесса и одинаковых частотах вращения крутильной рамки шаг скрутки изделия на машинах двойной скрутки вдвое меньше, чем на машинах одинарной скрутки, и появляется возможность вдвое увеличить линейную скорость по сравнению с машинами одинарной скрутки без увеличения частоты вращения крутильной рамки.

Это положение очень важно при скрутке пар и сердечника цифровых кабелей, где величина и стабильность шагов скрутки являются важнейшими параметрами, определяющими качество цифровой связи.

Машины разнонаправленной скрутки

Наиболее совершенную и стабильную скрутку изделий обеспечивают машины разнонаправленной многовитковой скрутки, при которой на длину изделия, соответствующую одному направлению скрутки, приходится до нескольких десятков круток (т.е. витков). Такая скрутка получила название *циклической* (имея в виду цикл из i круток одного направления) или *SZ*-скрутка.

Основной недостаток схем *SZ*-скрутки с точки зрения применения в КШД — большие величины переходных прямолинейных участков при скрутке (от 600 до 1500 мм). В последних моделях машин, например, TEL 70 производства фирмы *NEXTROM* (рис. 11.21) для уменьшения длины переходных участков применена система скрутки с трубчатыми торсионами, которые позволяют менять направление скрутки с большой скоростью, значительно уменьшая величины переходных участков (до 1,5 h).

В таких машинах кручение происходит только один раз и в одном месте, что уменьшает механическую деформацию жил и устраняет обратную усадку и удлинение проводников. Благодаря применению очень быстрых малоинерционных электрических приводов с торсионами, переходные участки выбираются по специальной программе и сохраняются оптимальные значения модуля скрутки.

В машинах скрутка пар (четверок) и элементарного пучка выполняется совместно, обеспечивая тем самым возможность непрерывного процесса производства кабелей с использованием линии наложения оболочки (шлангования).

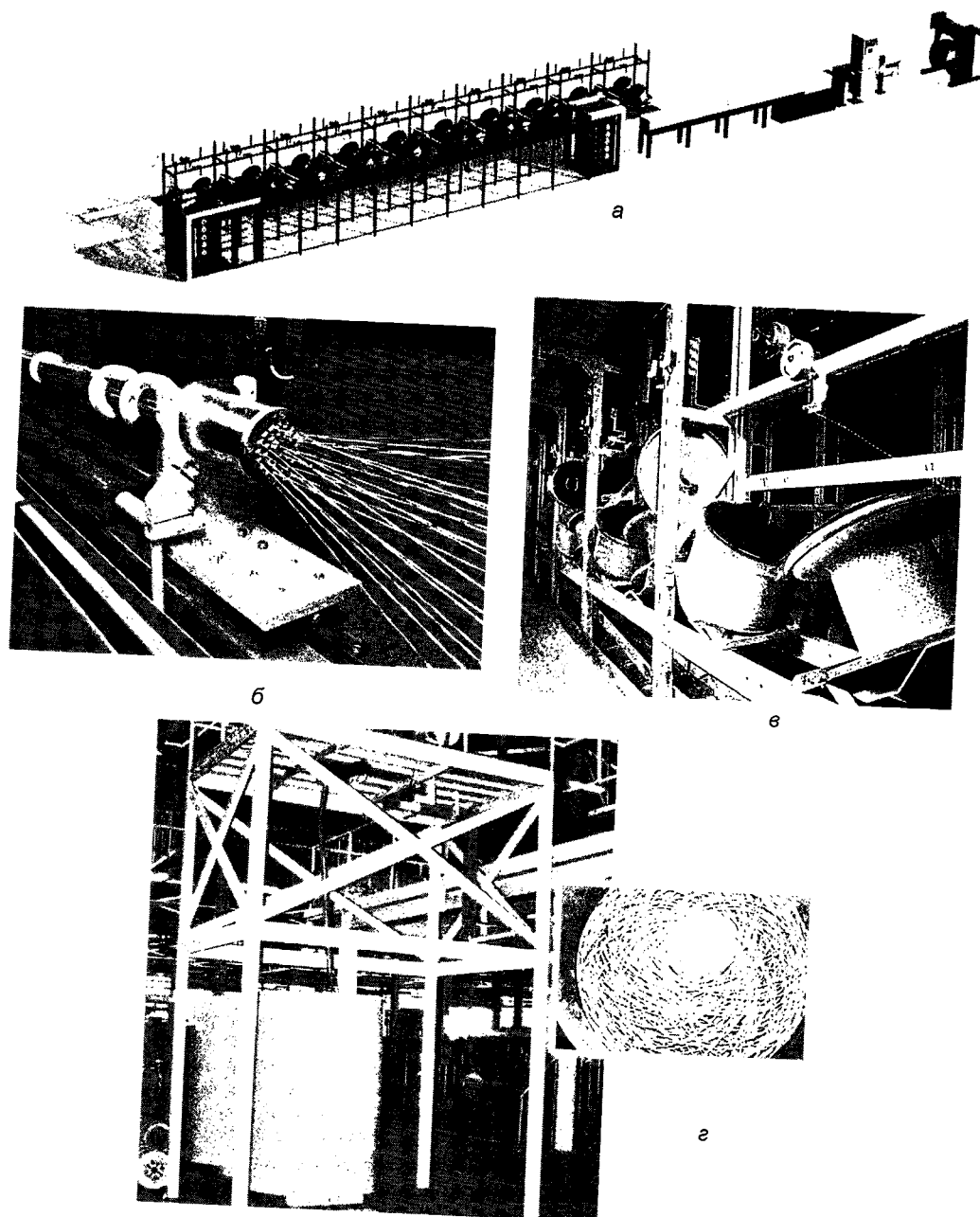


Рис. 11.21. Современная машина SZ-скрутки:
 а — внешний вид; б — калибр; в — отдатчики изолированной жилы;
 г — контейнерные приемники пучка

Фактически современные машины разнонаправленной скрутки по своим техническим параметрам и качеству изготавливаемой продукции выходят на один уровень с машинами однонаправленной скрутки, а по некоторым параметрам и значительно их превосходят.

При производстве кабелей широкополосного доступа применяют машины как однонаправленной скрутки, так и разнонаправленной. Вместе с тем, на наш взгляд, основным направлением в развитии технологии скрутки групп и пучков (сердечников) цифровых кабелей должно быть применение машин однонаправленной скрутки с согласованными шагами скрутки групп (пар и четверок).

Раздел 5

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ СКС И КШД ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ «ЭЛИКС-КАБЕЛЬ» И ОБЛАСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Глава 12. Конструкции кабелей СКС-КШД производства компании «Эликс-Кабель»

12.1. Номенклатура и область применения

В соответствии с техническими условиями «Кабели для структурированных систем связи» ТУ 3574-006-001.450.628-01–99 компания «Эликс-Кабель» выпускает кабели, предназначенные для СКС и сетей абонентского доступа. Здесь впервые обозначена универсальность конструкций, обеспечивающая применение как для локальных компьютерных сетей, так и сетей электросвязи. Введена отличительная марка кабелей. Так, для горизонтального участка СКС в соответствии с Международным стандартом ISO/IEC кабель UTP 4×2×0,52 в обозначении компании «Эликс-Кабель» представлен аббревиатурой ГВПВ 4×2×0,52 (Г — горизонтальный, ВП — витая пара, В — полихлорвиниловая оболочка).

Для отличия кабелей, выпускаемых компанией «Эликс-Кабель», от других производителей в марку кабеля введено буквенное обозначение ЭКС.

Таким образом, обозначение полной марки кабеля UTP 4×2×0,52 будет иметь вид ЭКС-ГВПВ–4×2×0,52.

Конструкция кабелей компании «Эликс-Кабель» обеспечивает их использование в широком диапазоне частот и в предусмотренных международными стандартами СКС цифровых сетях доступа.



Типы кабелей и рекомендуемые условия прокладки

В зависимости от диапазона частот использования различают конструкции симметричного кабеля по категориям:

Категория	Диапазон
1	100 кГц
2	1 МГц
3	16 МГц
5	100 МГц
5e	100 кГц
6	250 МГц

В зависимости от основной области применения кабельные изделия на основе витых пар производства предприятия подразделяют на основные виды:

- горизонтальный кабель;
- магистральный кабель;
- кабель для шнуров;
- провод для перемычек;
- подвесной кабель.

Типы кабелей и их определяющие конструктивные особенности должны соответствовать табл. 12.1, в которой также приведены рекомендации по условиям прокладки для кабелей каждого типа.

Таблица 12.1. Типы кабелей и рекомендуемые условия прокладки

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
1	ГВПВ	Горизонтальный кабель. Сердечник состоит из витых пар. Оболочка из ПВХ пластика	Предназначен для использования в горизонтальной подсистеме структурированных систем на участке от коммутационного оборудования в кроссовом помещении этажа до информационных розеток рабочих мест, а также в системе абонентского доступа
2	ГВПН	То же, что и ГВПВ, но оболочка из негорючего материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что в ГВПВ

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
3	ГВШШ	То же, что и ГВПВ, но оболочка из шлангового полиэтилена	Предназначен для использования в горизонтальной подсистеме структурированных систем при соединении между собой зданий и помещений с прокладкой кабеля вне зданий
4	ГВППЗ	То же, что и ГВПП, но с гидрофобным компаундом	То же, что ГВПВ, но в местах с возможным затоплением
5	МВШВ	Магистральный кабель. То же, что и ГВПВ с числом пар более 4	Предназначен для использования в магистральных подсистемах СКС для связи помещений между собой
6	МВПН	То же, что и МВПВ, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и МВШВ
7	МВШП	То же, что и ГВПП с числом пар более 4	То же, что МВПВ, но для прокладки кабеля вне зданий
8	МВППЗ	То же, что и МВПП, но с гидрофобным компаундом	То же, что ГВШВ, но в местах с возможным затоплением
9	МВПЗШп	То же, что и МВПВ, но с гидрофобным заполнением, с броней из стальной гофрированной ленты в полиэтиленовом шланге	То же, что и МВПВ, но для прокладки в грунте, канализации и между зданиями
10	МВПЗШпЭ	То же, что и МВПЗШп, но сердечник экранирован	То же, что и МВПЗШп, но для прокладки в условиях повышенных электромагнитных влияний
11	МВПЗШп/Э	То же, что и МВПЗШп, но экранированы витые пары	То же, что и МВПЗШп, но в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга
12	МВПЗШпЭ/Э	То же, что и МВПЗШп, но экранированы витые пары и сердечник одновременно	То же, что и МВПЗШп, но для прокладки в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга и внешних электромагнитных влияний
13	ПВП	Провод для перемычек. Сердечник состоит из витых пар (от 1 до 4). Без оболочки	Предназначен для использования в коммутационных панелях

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
14	ГВПВЭ	То же, что и ГВПВ, но сердечник экранирован	То же, что и ГВПВ, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний
15	ГВПНЭ	То же, что и ГВПВЭ, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ГВПВЭ
16	ГВППЭ	То же, что и ГВПВЭ, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что и ГВПВЭ, но для прокладки кабеля вне зданий
17	ГВППЗЭ	То же, что и ГВППЭ, но с гидрофобным компаундом	То же, что и ГВППЭ, но в местах с возможным затоплением
18	МВПВЭ	То же, что и ГВПВЭ с числом пар более 4	То же, что и МВПВ, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний
19	МВПНЭ	То же, что и МВПВЭ, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и МВПВЭ
20	МВППЭ	То же, что и МВПВЭ, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что и МВПВЭ, но для прокладки кабеля вне зданий
21	МВППЗЭ	То же, что и МВППЭ, но с гидрофобным компаундом	То же, что и МВППЭ, но в местах с возможным затоплением
22	ГВПВ/Э	То же, что и ГВПВ, но экранированы витые пары	То же, что и ГВПВ, но в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга
23	ГВПН/Э	То же, что и ГВПВ/Э, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ГВПВ/Э
24	ГВПП/Э	То же, что и ГВПВ/Э, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что и ГВПВ/Э, но для прокладки кабеля вне зданий
25	ГВППЗ/Э	То же, что и ГВПП/Э, но с гидрофобным компаундом	То же, что и ГВПП/Э, но в местах с возможным затоплением

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
26	МВПВ/Э	То же, что и ГВПВ/Э с числом пар более 4	То же, что и МВПВ, но в условиях повешенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга
27	МВИН/Э	То же, что и МВИВ/Э, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и МВПВ/Э
28	МВПП/Э	То же, что и МВПВ/Э, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что МВПВ/Э, но для прокладки кабеля вне зданий
29	МВППЗ/Э	То же, что и МВПП/Э, но с гидрофобным компаундом	То же, что МВПП/Э, но в местах с возможным затоплением
30	ГВПВЭ/Э	То же, что и ГВИВ, но экранированы витые пары и сердечник одновременно	То же, что и ГВИВ, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга и внешних электромагнитных влияний
31	ГВИНЭ/Э	То же, что и ГВИВЭ/Э, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ГВПВЭ/Э
32	ГВППЭ/Э	То же, что и ГВИВЭ/Э, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ГВПВЭ/Э, но для прокладки кабеля вне зданий
33	ГВППЗЭ/Э	То же, что и ГВППЭ/Э, но с гидрофобным компаундом	То же, что ГВППЭ/Э, но в местах с возможным затоплением
34	МВИВЭ/Э	То же, что и ГВПВЭ/Э с числом пар более 4	То же, что и ГВИВ, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга и внешних электромагнитных влияний
35	МВИНЭ/Э	То же, что и МВПВЭ/Э, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и МВПВЭ/Э
36	МВИПЭ/Э	То же, что и МВПВЭ/Э, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что МВПВЭ/Э, но для прокладки кабеля вне зданий

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
37	МВППЗЭ/Э	То же, что и МВППЭ/Э, но с гидрофобным компаундом	То же, что МВППЭ/Э, но в местах с возможным затоплением
38	ШВПВ	Кабель для шнуров. Сердечник состоит из витых пар с многопроволочными жилами	Предназначен для изготовления из него коммутационных и оконечных шнуров
39	ШВПН	То же, что и ШВПВ, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и МВПВ
40	ШВПШ	То же, что и ШВПВ, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ШВПВ, но для прокладки кабеля вне зданий
41	ШВПВЭ	То же, что и ШВПВ, но сердечник экранирован	То же, что и ШВПВ, но для прокладки в здании у условиях повышенных электромагнитных влияний
42	ШВПНЭ	То же, что и ШВПВЭ, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ШВПВЭ
43	ШВППЭ	То же, что и ШВПВЭ, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ШВПВЭ, но для прокладки кабеля вне зданий
44	ШВПВ/Э	То же, что и ШВПВ, но экранированы витые пары	То же, что и ШВПВ, но в условиях повешенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга
45	ШВПН/Э	То же, что и ШВПВ/Э, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ШВПВ/Э
46	ШВПП/Э	То же, что и ШВПВ/Э, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ШВПВ/Э, но для прокладки кабеля вне зданий
47	ШВПВЭ/Э	То же, что и ШВПВ, но экранированы витые пары и сердечник одновременно	То же, что и ШВПВ, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга и внешних электромагнитных влияний

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
48	ШВИНЭ/Э	То же, что и ШВПВЭ/Э, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ШВПВЭ/Э
49	ШВППЭ/Э	То же, что и ШВПВЭ/Э, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ШВПВЭ/Э, но для прокладки кабеля вне зданий
50	ВВИВс	То же, что и ГВИВ, но с подвесным самонесущим стальным тросом	То же, что и ГВПВ, но для прокладки по воздуху
51	ВВИНс	То же, что и ВВИВс, но оболочка из негорючего материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВПВс
52	ВВППс	То же, что и ВВИВс, но оболочка из шлангового полиэтилена	Предназначен для использования в горизонтальной подсистеме структурированных систем при соединении между собой зданий и помещений с прокладкой кабеля вне зданий
53	ВВИПЗс	То же, что и ВВППс, но с гидрофобным компаундом	То же, что ВВИПс, но в местах с возможным присутствием влаги
54	ВВПВЭс	То же, что и ВВИВс, но сердечник экранирован	То же, что и ВВПВс, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний
55	ВВИНЭс	То же, что и ВВПВЭс, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением.	То же, что и ВВПВЭс
56	ВВИПЭс	То же, что и ВВПВЭс, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ВВИВЭс, но для прокладки кабеля вне зданий
57	ВВИПЗЭс	То же, что и ВВППЭс, но с гидрофобным компаундом	То же, что ВВППЭс, но в местах с возможным присутствием влаги
58	ВВПВ/Эс	То же, что и ВВПВс, но экранированы витые пары	То же, что и ВВПВс, но в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
59	ВВПН/Эс	То же, что и ВВПВ/Эс, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВПВ/Эс
60	ВВПП/Эс	То же, что и ВВПВ/Эс, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ВВПВ/Эс, но для прокладки кабеля вне зданий
61	ВВППЗ/Эс	То же, что и ВВПП/Эс, но с гидрофобным компаундом	То же, что и ВВПВс, но в местах с возможным присутствием влаги
62	ВВПВЭ/Эс	То же, что и ВВПВс, но экранированы витые пары и сердечник одновременно	То же, что и ВВПВс, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга и внешних электромагнитных влияний
63	ВВПНЭ/Эс	То же, что и ВВПВЭ/Эс, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВПВЭ/Эс
64	ВВППЭ/Эс	То же, что и ВВПВЭ/Эс, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ВВПВЭ/Эс, но для прокладки кабеля вне зданий
65	ВВППЗЭ/Эс	То же, что и ВВППЭ/Эс, но с гидрофобным компаундом	То же, что ВВППЭ/Эс, но в местах с возможным присутствием влаги
66	ВВПВд	То же, что и ГВПВ, но с подвесным самонесущим диэлектрическим тросом	То же, что и ВВПВс, но для прокладки в условиях с повышенным электромагнитным фоном
67	ВВПНд	То же, что и ВВПВд, но оболочка из негорючего материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВПВд
68	ВВППд	То же, что и ВВПВд, но оболочка из шлангового полиэтилена	Предназначен для использования в горизонтальной подсистеме структурированных систем при соединении между собой зданий и помещений с прокладкой кабеля вне зданий
69	ВВППЗд	То же, что и ВВППд, но с гидрофобным компаундом	То же, что ВВППд, но в местах с возможным присутствием влаги

Продолжение таблицы 12.1

№ пп	Тип кабеля	Определяющие особенности конструкций	Назначение кабеля
70	ВВ1ВЭд	То же, что и ВВ1Вд, но сердечник экранирован	То же, что и ВВ1Вд, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний
71	ВВ1НЭд	То же, что и ВВ1ВЭд, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВ1ВЭд
72	ВВ1ПЭд	То же, что и ВВ1ВЭд, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ВВ1ВЭд, но для прокладки кабеля вне зданий
73	ВВ1ПЗЭд	То же, что и ВВ1ПЭд, но с гидрофобным компаундом	То же, что ВВ1ПЭд, но в местах с возможным присутствием влаги
74	ВВ1В/Эд	То же, что и ВВ1Вд, но экранированы витые пары	То же, что и ВВ1Вд, но в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга
75	ВВ1Н/Эд	То же, что и ВВ1В/Эд, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВ1В/Эд
76	ВВ1П/Эд	То же, что и ВВ1В/Эд, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ВВ1В/Эд, но для прокладки кабеля вне зданий
77	ВВ1ПЗ/Эд	То же, что и ВВ1П/Эд, но с гидрофобным компаундом	То же, что ВВ1П/Эд, но в местах с возможным присутствием влаги
78	ВВ1ВЭ/Эд	То же, что и ВВ1Вд, но экранированы витые пары и сердечник одновременно	То же, что и ВВ1Вд, но для прокладки в здании в условиях повышенных электромагнитных влияний витых пар друг на друга и внешних электромагнитных влияний
79	ВВ1НЭ/Эд	То же, что и ВВ1ВЭ/Эд, но оболочка из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением	То же, что и ВВ1ВЭ/Эд
80	ВВ1ПЭ/Эд	То же, что и ВВ1ВЭ/Эд, но оболочка из шлангового полиэтилена	То же, что ВВ1ВЭ/Эд, но для прокладки кабеля вне зданий

12.2. Конструкции кабелей СКС и КШД

Основу конструкции кабелей составляет витая пара (ВП).

Две изолированные медные жилы, отличающиеся по цвету, скручиваются в пары.

Для кабелей типов ГВПВ/Э, ГВПН/Э, ГВПП/Э, ГВПВЭ/Э, ГВПНЭ/Э, ГВППЭ/Э, МВПВ/Э, МВПН/Э, МВПП/Э, МВПВЭ/Э, МВПНЭ/Э, МВППЭ/Э, ШВПВ/Э, ШВПН/Э, ШВПП/Э, ШВПВЭ/Э, ШВПНЭ/Э, ШВППЭ/Э, ВВПВ/Эс, ВВПН/Эс, ВВПП/Эс, ВВПВЭ/Эс, ВВПНЭ/Эс, ВВППЭ/Эс, ВВПВ/Эд, ВВПН/Эд, ВВПП/Эд, ВВПВЭ/Эд, ВВПНЭ/Эд, ВВППЭ/Эд, МВПЗЫШП/Э и МВПЗЫШПЭ/Э поверх витых пар располагаются экраны из фольгированного лавсана.

Диаметр медных жил — 0,52 мм.

Для кабелей типов ШВПВ, ШВПН, ШВПП, ШВПВЭ, ШВПНЭ, ШВППЭ, ШВПВ/Э, ШВПН/Э, ШВПП/Э, ШВПВЭ/Э, ШВПНЭ/Э, ШВППЭ/Э жилы изготавливаются из 7...11 скрученных медных проволок.

Жилы изолируются сплошным слоем полиэтилена.

Номинальный диаметр изолированной жилы — не более 1,0 мм (для шнуров — 1,1 мм).

Витые пары скручиваются в сердечник.

Сердечник кабеля должен содержать:

- горизонтальные кабели 2 или 4 витые пары;
- магистральные кабели..... более 4-х витых пар (предпочтительные значения — 25, 50 или 100 пар);
- шнуры 4 витые пары;
- провода и перемычки 1, 2, 3 или 4 витые пары;
- подвесные кабели 2, 4 или 8 витых пар.

Цветовая системы изолированных проводников для горизонтальных и магистральных кабелей должна соответствовать табл. 12.2 и 12.3

Таблица 12.2. Цветовая маркировка пар в пучке горизонтального кабеля

Пара 1	Цвет провода <i>a</i>	Цвет провода <i>b</i>
1	Белый	Синий
2	Белый	Оранжевый
3	Белый	Зеленый
4	Белый	Коричневый

Таблица 12.3. Цветовая маркировка пар в пучке многопарного кабеля

Группа	Цвет первого провода пар в группе	Цвет второго провода				
		пара 1	пара 2	пара 3	пара 4	пара 5
1	Белый	Синий	Оранжевый	Зеленый	Коричневый	Серый
2	Красный	Синий	Оранжевый	Зеленый	Коричневый	Серый
3	Черный	Синий	Оранжевый	Зеленый	Коричневый	Серый
4	Желтый	Синий	Оранжевый	Зеленый	Коричневый	Серый
5	Фиолетовый	Синий	Оранжевый	Зеленый	Коричневый	Серый

Для кабелей ГВПП, МВПП, ГВПН, МВПН, МВПЗЫШп, ШВПН, ШВПП, ВВПНд, ВВППд, ВВПНс и ВВППс поверх сердечника располагается полиэтиленерефтолатная лента.

Для кабелей типа ГВПВ/Э, МВПВЭ, ШВПВЭ, ГВПНЭ, МВПНЭ, ШВПНЭ, ГВППЭ, МВППЭ, ШВППЭ, МВПЗЫШпЭ, ВВПВЭд, ВВПНЭд, ВВППЭд, ВВПВЭс, ВВПНЭс, ВВППЭс поверх сердечника располагается полиэтиленерефтолатная лента и экран. Причем лента располагается под экраном. Между лентой и экраном находится контактная медная проволока.

Для кабелей типа ГВПВЭ/Э, МВПВЭ/Э, ШВПВЭ/Э, ГВПНЭ/Э, МВПНЭ/Э, ШВПНЭ/Э, ГВППЭ/Э, МВППЭ/Э, ШВППЭ/Э, МВПЗЫШпЭ/Э, ВВПВЭ/Эд, ВВПНЭ/Эд, ВВППЭ/Эд, ВВПВЭ/Эс, ВВПНЭ/Эс, ВВППЭ/Эс поверх сердечника располагается экран. Под экраном находится контактная медная проволока.

Поверх сердечника накладывается оболочка.

Оболочка может быть выполнена из ПВХ или из материала, не содержащего галогенов с низким дымовыделением. Оболочка кабелей для внешней прокладки выполняется из полиэтилена. Возможные толщины оболочки приведены в табл. 12.4.

Для кабелей категории б в центре располагается крестообразный сердечник, изолирующий друг от друга каждую пару.

Для всех подвесных кабелей в качестве несущего элемента используется стальной трос либо стеклопластиковый пруток.

Строительные длины кабеля 300, 305, 500 или 1000 м. По соглашению сторон допускается сдача кабеля любыми длинами.

Таблица 12.4. Рекомендуемые значения толщин оболочек

Диаметр кабеля под оболочкой, мм	Толщина оболочки, мм	Максимальное отклонение толщины оболочки, мм
До 5	0,8	0,2
5...10	1	0,3
10...15	1,5	0,3
15...20	2	0,4
20...30	3,0	0,5
30...40	3,5	0,6
40...50	4,0	0,6
Более 50	4,2	0,7

Примечание. Конкретные значения толщины оболочек указываются в технологической документации.

12.3. Основные электрические характеристики кабелей компании «Эликс-Кабель», используемых на сетях СКС

Электрические характеристики на постоянном токе:

- электрическое сопротивление жил
приведенное к 20 °С, не более 9,5 Ом/100 м;
- сопротивление изоляции жил, не менее 5000 МОм·км;
- асимметрии жил рабочей пары, не более 3,0%;
- электрическая емкость цепи, не более 5,3 нФ/100 м.

Электрические характеристики на переменном токе:

- затухание цепей в рабочем диапазоне частот не должно превышать значений, приведенных в табл. 12.5;
- переходное затухание между цепями на ближнем конце A_0 (NEXT) на строительной длине должно быть не менее значений, приведенных в табл. 12.6;
- волновое сопротивление цепей в рабочем диапазоне частот 100±15 Ом.

Таблица 12.5. Затухание горизонтальных, магистральных кабелей и проводов для перемычек

Частота, МГц	Затухание, дБ/100 м, не более					
	категория 1	категория 2	категория 3	категория 5	категория 5е	категория 6
0,1	16	5,5	–	–	–	–
1,0	–	5,8	2,6	2,0	2,0	2,0
4,0	–	–	5,6	4,1	4,1	3,8
8,0	–	–	8,5	5,8	5,8	5,3
10,0	–	–	9,7	6,5	6,5	6,0
16,0	–	–	13,1	8,2	8,2	7,6
20,0	–	–	–	9,3	9,3	8,5
25,0	–	–	–	10,4	10,4	9,5
31,25	–	–	–	11,7	11,7	10,7
62,5	–	–	–	17,0	17,0	15,4
100	–	–	–	22	22,0	19,8
200	–	–	–	–	–	29,0
250	–	–	–	–	–	32,8

Таблица 12.6. Переходное затухание между цепями на ближнем конце (NEXT) кабелей всех типов

Частота, МГц	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ, не менее					
	категория 1	категория 2	категория 3	категория 4	категория 5е	категория 6
0,1	50	60	–	–	–	–
1,0	–	38	41	62	65,3	74,3
4,0	–	–	32	53	56,3	65,3
8,0	–	–	27	48	51,8	60,8
10	–	–	26	47	50,3	59,3
16	–	–	23	44	47,3	56,2
20	–	–	–	42	45,8	54,8
25	–	–	–	41	44,3	53,3
31,25	–	–	–	40	42,9	51,9
62,5	–	–	–	35	38,4	47,4
100	–	–	–	32	35,3	44,3
200	–	–	–	–	–	39,8
250	–	–	–	–	–	38,3

12.4. Основные электрические характеристики кабелей СКС-КШД в диапазоне использования сетей широкополосного доступа

Как отмечалось выше, кабели ЭКС-ГВПВ и их модификации, в соответствии с техническими условиями ТУ 3574-006-001.450.628-01–99 предназначены для структурированных систем связи и сетей абонентского доступа.

В последние годы большое распространение на местных телефонных сетях на абонентском участке, так называемой «последней миле», получила технология DSL, использующая различные цифровые коды (2B1Q, CAP, TC-PAМ, DMT).

Диапазон частот, используемых для передачи цифровых сигналов, распространяется до 4,0 МГц, что позволяет передавать информацию со скоростью до 25...52 Мбит/с.

Поэтому представим основные электрические характеристики универсальных кабелей СКС-КШД в этом диапазоне частот.

Результаты измерений получены при использовании комплекса приборов фирмы «Аналитик-ТС» (анализатор систем передачи и кабелей связи An Com A7). Исследованиям электрических характеристик подверглись серийно выпускаемые компанией «Эликс-Кабель» следующие конструкции кабелей:

ГВПВ-5 2×2×0,52 — аналог UTP 2×2×0,52, неэкранированный;

ГВПВ-5е 4×2×0,52 — аналог S/UTP с общим экраном;

ГВПВЭ/Э-5 2×2×0,52 — аналог S/STP с экранированием каждой пары;

ГВПВЭ-5 4×2×0,52 — аналог S/UTP с общим экраном.

В табл. 12.7, 12.8 приведены результаты измерений электрических характеристик кабелей: сопротивления на постоянном токе, рабочей емкости и затухания цепей в диапазоне частот до 4,0 МГц. В табл. 12.9 представлены выборочные результаты измерений переходного затухания на ближнем A_0 (NEXT) и переходного затухания A_3 (защищенности) на дальнем концах.

Таблица 12.7. Коэффициент затухания кабелей СКС-КШД, дБ/км

Марка кабеля	$R_{ш.л.}$ Ом/км	C_p нФ/км	Частота, кГц											
			100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	2000	3000	4000
ГВПВЭ-5 2×2×0,52	$R = 158,6$	$C = 54,0$	7,28	10,2	12,8	15,0	16,9	18,6	20,8	23,6	28,1	31,7	37,5	42,4
ГВПВ-5е 4×2×0,52	$R = 165,6$	$C = 50,2$	6,21	7,79	9,4	10,8	12,1	13,3	14,4	17,1	21,0	24,2	29,5	31,15

Продолжение таблицы 12.7

Марка кабеля	$R_{шл},$ Ом/км	$C_p,$ нФ/км	Частота, кГц											
			100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	2000	3000	4000
ГВПВЭ-5 2x2x0,52	$R = 165,0$	$C = 96,14$	12,82	18,95	24,77	29,9	34,52	38,7	42,5	51,96	63,9	73,7	87,4	98,29
ГВПВЭ-5 4x2x0,52	$R = 163,0$	$C = 58,71$	7,15	10,17	12,6	14,7	16,4	18,2	19,65	23,2	27,16	30,7	37,5	42,9

Таблица 12.8. Переходное затухание между цепями кабеля СКС-КШД на ближнем конце, дБ

Марка кабеля	Частота, кГц											Длина кабеля, м
	100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	2000	4000	
ГВПВЭ-5 2x2x0,52	84,0	79,0	74,0	69,0	69,0	68,0	72,0	67,0	66,0	67,0	65,0	500
ГВПВ-5е 4x2x0,52	90,0	88,0	83,0	80	87,0	86,0	85,0	77,0	76,0	68,0	75,0	305
ГВПВЭ-5 2x2x0,52	90,0	93,0	90,0	85,0	85,0	82,0	81,0	84,0	87,0	91,0	89,0	455
ГВПВЭ-5 4x2x0,52	90,0	91,0	89,0	88,0	84,0	78,0	75,0	75,0	65,0	66,0	65,0	305

Таблица 12.9. Переходное затухание между цепями кабелей СКС-КШД на дальнем конце (защищенность), дБ

Марка кабеля	Частота, кГц											Длина кабеля, м
	100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	2000	4000	
ГВПВЭ-5 2x2x0,5	83,4	81,9	77,7	73,6	74,6	71,8	70,0	67,2	62,0	60,2	54,8	500
ГВПВ-5е 4x2x0,52	84,1	82,6	77,2	76,7	74,1	73,0	71,6	69,8	65,6	66,6	57,6	305
ГВПВЭ-5 2x2x0,52	95,0	93,0	92,0	90,0	88,0	86,0	85,0	83,0	82,0	80,0	75,0	455
ГВПВЭ-5 4x2x0,52	82,8	81,9	85,2	82,5	80,0	79,4	78,0	76,0	71,5	65,4	62,0	305

Анализ результатов измерений электрических характеристик кабелей СКС-КШД (табл. 12.10) показал:

1. Рабочая емкость пар зависит от конструкции кабеля:

- наименьшая емкость в неэкранированных конструкциях;
- общий экран увеличивает рабочую емкость на 15–18%;
- экран каждой пары увеличивает рабочую емкость на 50–60%.

2. Коэффициент затухания пар на частотах 100 и 1000 кГц в кабелях с общим экраном увеличивается на 14 и 17% соответственно.

3. Экранирование отдельных пар в кабелях по сравнению с кабелями с общим экраном увеличивает коэффициент затухания на 175 и 220% соответственно.

Таблица 12.10. Измерения электрических характеристик кабелей СКС-КШД

Параметр		Марка кабеля			
		ГВПВ 4×2×0,5	ГВПВЭ 4×2×0,52	ГВПВЭ 2×2×0,5	ГВПВЭ/Э 2×2×0,52
C_p , нФ/км		50,0	58,7	52,0	96,0
α , дБ/км	100 кГц	6,2	7,1	7,28	12,8
	1000 кГц	17,1	23,2	23,6	51,96

При определении возможности применения кабелей СКС и КШД для уплотнения DSL-оборудованием на сети абонентского доступа следует учитывать конструктивные особенности кабелей.

Граничные условия применения кабелей ЭКС-ГВПВ, ЭКС-ГВПВЭ, ЭКС-ГВПВЭ/Э и типовые решения для «последней мили» будут приведены в гл. 13.

Глава 13. Применение универсальных кабелей СКС-КШД на цифровых сетях абонентского доступа

13.1. Сравнительная оценка возможности кабелей СКС-КШД и ТПП_{Эп}

Структурированные кабельные сети — это основная область применения кабелей с «витой» парой.

Однако «витая» пара составляет основу всех кабелей связи, поэтому рассмотрим применение кабелей СКС в области сетей связи.

Бурное развитие цифрового уплотнения абонентских линий (технологии xDSL) потребовало переоценки взглядов на линии связи. Теперь участок городской связи от АТС до абонента становится цифровым (высокочастотным).

Традиционные кабели типа ТПП (ГОСТ Р 51311–99) уже не удовлетворяют требованиям жизни.

Применяемый тип разнонаправленной скрутки жил (SZ-скрутка) далек от идеала. Он обеспечивает выполнение требований по взаимным влияниям между парами только в низкочастотном диапазоне. Вернем многопарным кабелям статус кабелей с «витой» парой, так как все кабели зонной и дальней связи всегда имели основу из «витых» пар, скрученных по классической однопаражной схеме.

Кабели СКС, в основу которых положена витая пара с малым шагом, обеспечивают необходимые параметры передачи и влияния в диапазоне до 100, 250 и 600 МГц.

Оценим упомянутые кабели в диапазоне частот, используемых для технологии DSL, на конструкциях кабелей компании «Эликс-Кабель».

При разработке кабелей СКС и составлении технических условий прогнозировалась возможность широкого применения этих кабелей. Поэтому в соответствующих документах были введены симметричные кабели категории 1 и 2, используемые в диапазоне частот до 100 кГц и 1,0 МГц. Кроме того, были предусмотрены конструкции кабелей для внешней прокладки в телефонной канализации и грунте. Технические решения были заимствованы из многочисленных применений кабелей с полиэтиленовой изоляцией жил на сетях связи.

Условия применения кабелей СКС в сетях доступа

Оценим электрические характеристики кабелей СКС в диапазоне частот до 2,0 МГц.

Возможность использования многопарных кабелей для линий цифрового уплотнения (xDSL) определяется выполнением условий электромагнитной совместимости (ЭМС) в ансамбле цепей дискретной и аналоговой информации.

В соответствии с ОСТ Р 45.81–97 «Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральных и внутризонных первичных сетей» (Минсвязи России, 1996) и проведенными исследованиями определены обобщенные критерии ЭМС на кабельных линиях местной связи.

Для обеспечения достоверности передачи цифровых систем (xDSL) в зависимости от структуры кода, используемого в оборудовании (HDB-3, 2B1Q и CAP), определены параметры защищенности сигнал/помеха a_3 соответственно 24,7; 25,7 и 32 дБ.

Предложено оценку взаимных влияний между цепями осуществлять на частоте максимального сосредоточения энергии, используя упрощенный метод оценки переходного затухания на ближнем A_0 (NEXT) и дальнем A_3 (FEXT) концах линии.

Требуемые величины A_0 и A_3 определяются по формулам

$$A_0 = a_3 + \alpha \ell + 10 \lg N, \quad A_3 = a_3 + 10 \lg N,$$

где a_3 — защищенность сигнал/помеха; $\alpha \ell$ — усилительная способность оборудования DSL (перекрываемое затухание); N — количество цепей, использующих технологию DSL.

В табл. 13.1 приведены требования к A_0 для рассматриваемого оборудования с различным кодированием сигнала при средней усилительной способности оборудования 40 дБ.

Таблица 13.1. Нормируемая величина переходного затухания между цепями на ближнем конце (NEXT), дБ, не менее

Код DSL	Информационная скорость, кбит/с	Частота оценки A_0 , кГц	Количество влияющих цепей xDSL				
			1	2	3	4	10
HDB-3	2048	1024	64,7	67,5	69,5	70,7	74,7
2B1Q	160	40	65,7	68,5	69,5	71,7	75,7
CAP-128	2320	150	72,0	74,8	76,8	78,8	80,0

Рассмотрим возможность применения многопарных кабелей СКС на абонентском участке сети доступа.

В соответствии с ГОСТ Р 51311–99 отечественной промышленностью выпускаются кабели ТПП_{ЭП} и ТПП_{ЭПЗ} емкостью от 10 до 1200 пар с медными жилами диаметром 0,4; 0,5 и 0,64 мм в полиэтиленовой изоляции с полиэтиленовой оболочкой.

Кабели предназначены для использования в низкочастотном диапазоне частот. Переходное затухание между цепями нормируется на частоте 1000 Гц и должно быть не менее 69,5 дБ. В спектре высоких частот этот параметр не нормируется.

Сравним параметры передачи и влияния между цепями в диапазоне частот до 2,0 МГц в кабелях типа ТПП_{ЭП}, используемых на телефонных сетях, и кабелей СКС — ЭКС-ГВПВ.

В табл. 13.2–13.6 приведены результаты экспериментальных исследований параметров влияния на строительных длинах кабеля.

Таблица 13.2. Переходное затухание между цепями на ближнем конце A_0 (NEXT), дБ, кабелей (УТР) ЭКС-ГВПВ-5 4×2×0,52, $l = 300$ м

Комбинации цепей	Измерительные частоты, кГц					
	1	80	160	512	1024	2048
1–2	95	93	91	95	89	75
1–3	90	90	93	78	72	62
1–4	93	85	80	79	75	74
2–3	96	94	92	80	77	72
2–4	94	87	82	91	84	70
3–4	96	98	90	77	74	70

Таблица 13.3. Переходное затухание между цепями на дальнем конце A_z , дБ, для кабелей (УТР) ЭКС-ГВПВ-5 4×2×0,5

Комбинации цепей	Измерительные частоты, кГц					
	1	80	160	512	1024	2048
1–2	100/100	99/99	91/90	77/88	84/77	70/67
1–3	99/99	97/92	90/93	69/76	66/65	56/54
1–4	97/97	77/75	74/78	76/82	68/70	66/68
2–3	99/99	75/99	74/91	64/88	62/77	69/83
2–4	87/88	77/86	73/84	74/77	64/75	67/76
3–4	93/93	87/86	83/84	67/67	60/60	65/65

Таблица 13.4. Переходное затухание между цепями на ближнем конце A_0 , дБ, для кабеля ТПП_{эл} 10×2×0,5, $\ell = 285$ м

Влияющие	Подверженные влиянию										Для частоты 80 кГц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		68	63	70	67	72	64	72	68	73	
2	66		62	68	65	71	66	73	67	71	
3	64	60		64	70	62	71	74	65	72	
4	63	62	61		65	71	69	70	67	69	
5	64	60	69	68		64	70	69	71	74	
6	70	69	67	70	62		68	64	69	71	
7	65	64	69	67	65	64		69	65	70	
8	70	70	68	64	66	62	66		68	71	
9	65	65	64	65	70	71	68	65		67	
10	70	72	70	66	71	69	67	70	65		
Для частоты 160 кГц											

Таблица 13.5. Переходное затухание между цепями на ближнем конце A_0 (NEXT), дБ, для кабеля ТПП_{эл} 10×2×0,5, $\ell = 285$ м

Влияющие	Подверженные влиянию										Для частоты 512 кГц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		59	59	58	61	58	63	67	61	66	
2	61		58	62	65	77	70	62	63	65	
3	60	62		70	60	70	67	64	66	65	
4	62	65	72		62	60	63	58	64	67	
5	65	65	65	66		71	70	61	70	66	
6	63	75	72	72	75		70	65	64	63	
7	67	73	70	74	73	73		66	69	70	
8	70	65	68	72	74	70	72		63	64	
9	65	67	70	73	74	72	70	71		59	
10	70	69	68	71	73	68	72	70	71		
Для частоты 256 кГц											

Таблица 13.6. Переходное затухание между цепями на ближнем конце A_0 (*NEXT*), дБ, для кабеля ТПП_{Эп} 10×2×0,5, $\ell = 285$ м

Влияющие	Подверженные влиянию										Для частоты 2048 кГц
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		48	43	43	47	47	54	50	45	47	
2	57		53	49	47	51	55	53	46	47	
3	50	62		50	46	51	50	55	49	56	
4	49	57	61		53	50	58	54	55	63	
5	49	61	69	68		50	50	63	54	59	
6	59	52	67	70	62		65	63	44	58	
7	60	57	69	67	65	64		65	52	45	
8	62	59	68	64	66	62	66		58	63	
9	48	52	64	65	70	71	68	65		47	
10	48	55	70	66	71	69	67	70	65		
Для частоты 1024 кГц											

Итак, в соответствии с рекомендациями по ЭМС цепей, оборудованных устройствами xDSL (см. табл. 13.1) величина A_0 (*NEXT*) должна быть в пределах 75...80 дБ при уплотнении до 10 пар в многопарных кабелях.

Анализ параметров влияния, приведенных в табл. 13.4–13.6, показал, что в линиях из кабеля ТПП_{Эп} для цифрового уплотнения необходимо осуществлять отбор пар.

Оценка кабелей СКС более оптимистична.

Так, в кабеле UTP (см. табл. 13.2, 13.3) величина A_0 (*NEXT*) между любыми комбинациями пар, как правило, превышает норму по ЭМС и позволяет уплотнять все цепи в диапазоне до 1024 кГц.

Многопарные кабели СКС

Многопарные кабели СКС в соответствии с Техническими условиями (ТУ 3574-006-001.450.628-01–99) конструктивно представляют собой пучки, собранные из элементарных групп 4×2×0,52.

Так, кабель ЭКС-МВПВ 25×2×0,52 имеет шесть пучков, свитых в общий сердечник, в центре которого расположена одна пара. На рис. 13.1 приведена конструкция этого кабеля.

Взаимные влияния между цепями внутри пучка в кабеле достаточно высокие (75...80 дБ); A_0 (*NEXT*) между парами, размещенными в разных элементарных группах, примерно на 10 дБ больше, чем, например, внутри основной группы и составляют во всем диапазоне частот до 2,0 МГц 85...90 дБ.

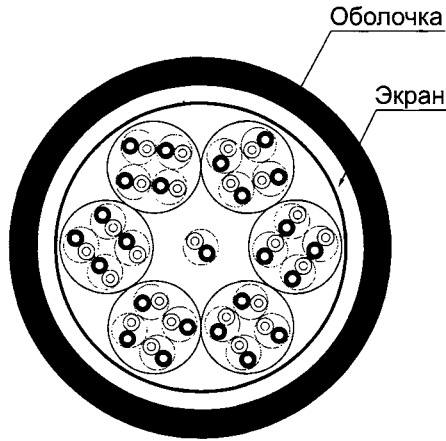


Рис. 13.1. Конструкция кабеля ЭКС-МВПВ 25×2×0,52

Для сравнения на рис. 13.2 приведены средние значения величин переходного затухания между цепями на ближнем конце A_0 (*NEXT*) для кабелей серийного производства ТППЭП и кабелей СКС в диапазоне частот до 2,0 МГц.

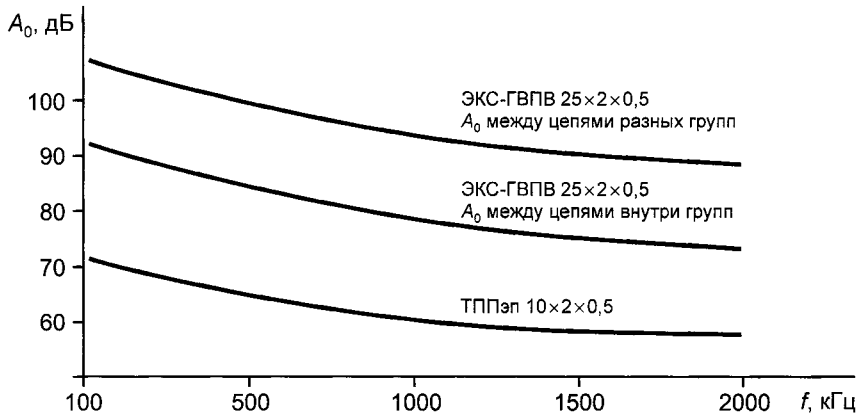


Рис. 13.2. Средние значения переходного затухания A_0 кабелей ТППЭП и СКС

В соответствии с ТУ компания «Эликс-Кабель» выпускает многопарные кабели ЭКС-МВПВ с диаметром медных жил 0,52 и 0,64 мм в номенклатуре до 100 пар.

Предусмотрена конструкция кабелей с экранированными группами, например, ЭКС-МВПВ 4 (4×2×0,52) + 23 (4×2×0,52) + 3 (1×4×0,64).

Для примера на рис. 13.3 приведены фрагменты городской телефонной сети с применением серийно выпускаемых кабелей ТПП_{ЭП} и многопарных кабелей СКС типа ЭКС-МВПВ.

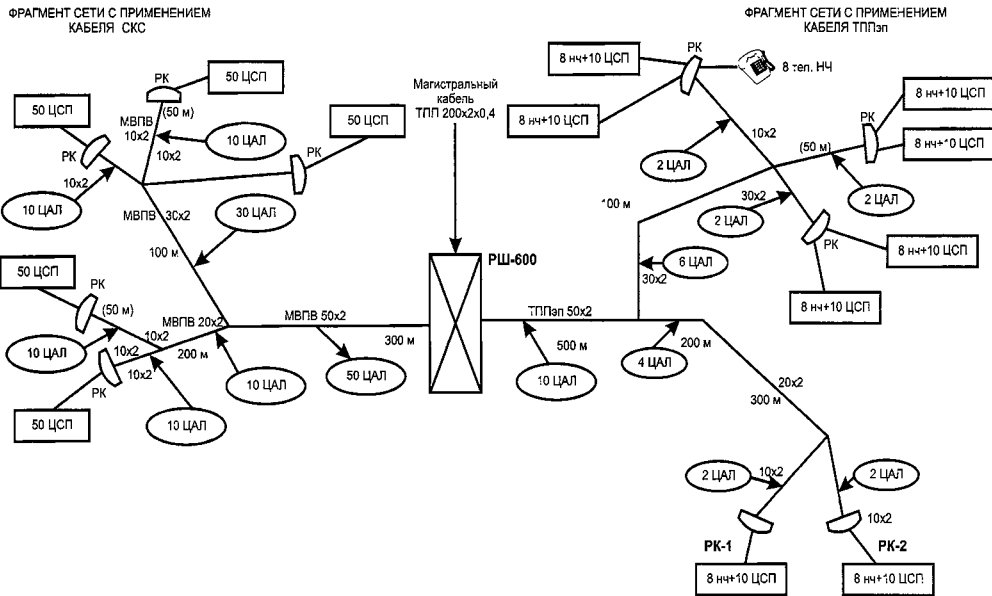


Рис. 13.3. Фрагмент ГТС с применением кабелей ТПП_{ЭП} и СКС:
 ЦАП — цифровая абонентская линия; НЧ — канал низкочастотный;
 ЦСП — канал, образованный при помощи цифрового оборудования xDSL;
 РШ — распределительный шкаф; РК — распределительная коробка

Из приведенной схемы видно, что применение кабелей СКС позволяет обеспечить 100%-ное использование пар для уплотнения цифровыми системами передачи. Так, при использовании оборудования xDSL FlexGain PCM 4/5, выпускаемого НТЦ «НАТЕКС», и кабелей типа ЭКС-МВПВ 25×2×0,52 может быть получено 250 КШД по 64 кбит/с.

При использовании серийно выпускаемых кабелей типа ТПП_{ЭП}, требующих отбора пар, на каждой распределительной коробке может быть получено только две цепи, оборудованных ЦСП, по которым возможно будет организовать передачу сигналов.

Таким образом, из представленной схемы организации связи следует, что на кабеле ТПП_{ЭП} может быть организовано 50 цифровых каналов. Применение кабелей СКС с использованием существующей технологии цифрового уплотнения линий (DSL) позволит во много раз увеличить пропускную способность вновь строящихся отечественных сетей.

13.2. Типовые схемы организации сетей доступа на линиях местной связи с применением СКС-КШД и оборудования DSL

В [6] приведены технические характеристики оборудования цифрового уплотнения (DSL), применяемого на сетях связи: FlexGain PCM4/5, PCM11/12, PCM 4d, Oton и др.

Рассмотрим главные принципы использования указанного оборудования на кабелях СКС-КШД.

Основной задачей при выборе типовых решений применения кабелей для цифрового уплотнения является определение максимальной длины линии исходя из технических характеристик параметров цепей линий и оборудования.

Ключевыми параметрами признаются: частотный диапазон использования линий, коэффициент затухания и параметры влияния между цепями.

Схема организации связи с применением кабелей СКС-КШД и оборудования FlexGain приведена на рис. 13.4.

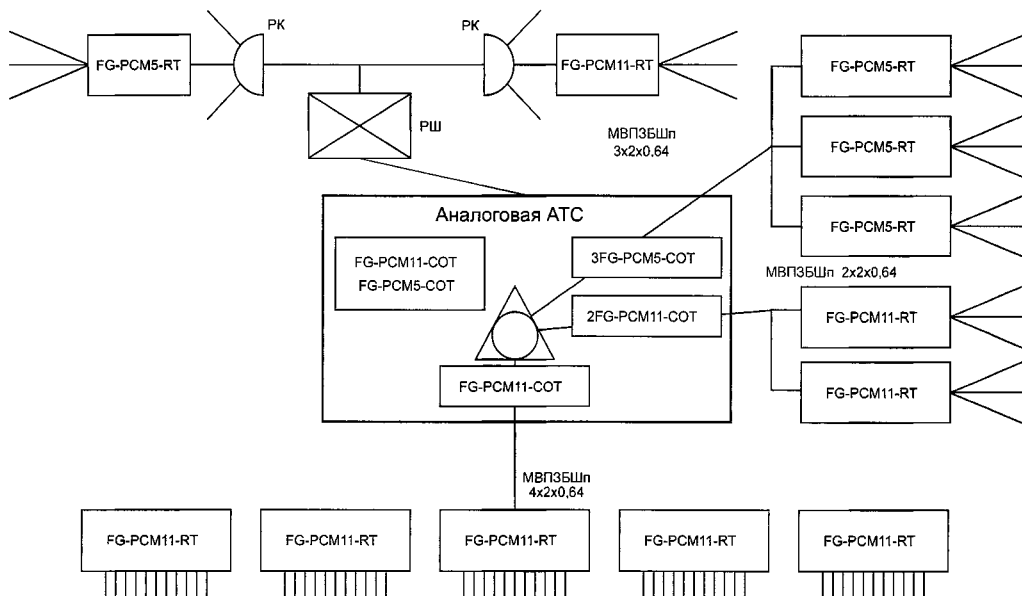


Рис. 13.4. Типовые схемы организации сети:

МВПЗБШп 2x2x0,64; 3x2x0,64; 4x2x0,64 — магистральные кабели для наружной прокладки;

PK — распределительная коробка; PШ — распределительный шкаф;

FG-PCM11-COT, FG-PCM11-RT — станционный и абонентский полукомплекты для оборудования цифрового уплотнения абонентских линий FG-PCM11/12;

FG-PCM5-COT, FG-PCM5-RT — станционный и абонентский полукомплекты для оборудования цифрового уплотнения абонентских линий FG-PCM4/5

13.3. Применение оборудования FlexGain PCM 4/5 на кабеле МВПЗБШп 2×2×0,64

Конструктивные и усредненные значения электрических характеристик кабелей МВПЗБШп 2×2×0,64, параметры передачи и влияния приведены в гл. 12.

Технические характеристики оборудования FlexGain PCM4/5, необходимые для определения возможного использования на линиях связи:

- число телефонных каналов на одной абонентской линии 4/5
- информационная скорость передачи, кбит/с 336
- линейный код 2B1Q
- сопротивление цепи линии (шлейф), Ом, не более 1150
- рабочая частота, кГц 63
- максимальное затухание линии на частоте 63 кГц, дБ 44

Как отмечалось ранее, требования к переходному затуханию между цепями на ближнем конце кабеля A_0 , оборудованных устройствами xDSL, работающими с линейным кодом 2B1Q, определяется по формуле

$$A_0 \geq 16,2 + 20\lg(L - 1) + \alpha \ell + 10\lg N,$$

или $A_0 \geq 25,7 + \alpha \ell + 10\lg N$,

где 25,7 — защищенность между цепями, обеспечивающая заданную верность передачи для кода 2B1Q, дБ; α — коэффициент затухания цепи кабеля, дБ; ℓ — длина линии, км; $\alpha \ell$ — перекрываемое затухание цепи; N — количество цепей, уплотненных оборудованием xDSL.

Расчет протяженности линий при применении оборудования FlexGain PCM4/5 на кабеле МВПЗБШп 2×2×0,64. Подставляем в последнюю формулу исходные данные на частоте 63 кГц и получаем

$$A_0 = 25,7 + 44 + 3 = 72,7 \text{ дБ.}$$

Тогда максимальная длина линии определяется из выражения

$$\ell = (A_0 - a_3 - 10\lg N) / \alpha = (72,7 - 25,7 - 3) / 4,0 = 11 \text{ км.}$$

При минимальном среднестатистическом значении A_0 на частоте 63 кГц, равном 65,4 дБ, протяженность линий не должна превышать 9,2 км.

Результаты расчета приведены в табл. 13.7 и на рис. 13.5.

Таблица 13.7. Результаты расчета переходного затухания между цепями на ближнем конце для линий при уплотнении оборудованием FlexGain PCM4/5 на кабеле МВПЗБШп 2×2×0,64

Длина линии, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Рабочее затухание, дБ	4,0	8,0	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,0
Требования к A_0 , дБ	32,7	36,7	40,7	44,7	48,7	52,7	56,7	60,7	64,7	68,7	72,7

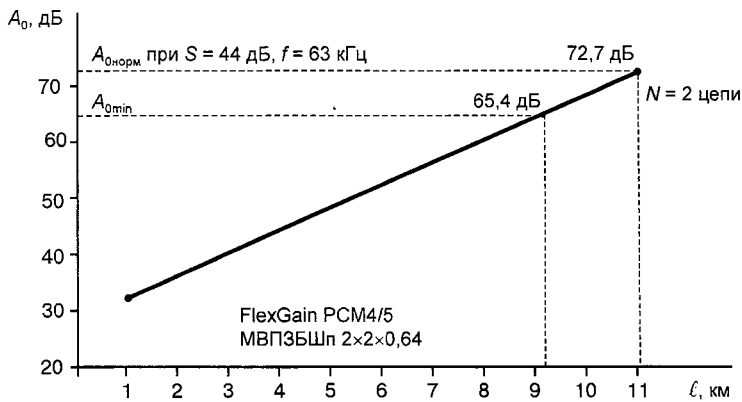


Рис. 13.5. Расчетная величина требуемого переходного затухания между цепями на ближнем конце для линий из кабеля МВПЗБШп 2×2×0,64 при уплотнении оборудованием FlexGain (FG) РСМ4/5

В табл. 13.8 приведены требования к переходному затуханию A_0 в зависимости от длины линии для для трех-, пяти- и десятипарных кабелей МВПЗБШп.

Таблица 13.8. Требования к величине A_0 для кабельных линий МВПЗБШп, уплотненных системами FlexGain РСМ 4/5

Длина линии, км		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рабочее затухание, дБ		4,3	8,6	12,9	17,2	21,5	25,8	30,1	34,4	38,7	44,0
Требования МВПЗБШп к A_0 , дБ	3×2×0,64	34,8	39,1	43,4	47,7	52,0	56,3	60,6	64,9	69,2	74,5
	5×2×0,64	37,0	41,3	45,6	49,9	54,2	58,5	62,8	67,1	71,4	76,7
	10×2×0,64	40,0	44,3	48,6	52,9	57,2	61,5	65,8	70,1	74,4	79,7

13.4. Применение оборудования FlexGain РСМ11/12 на кабеле МВПЗБШп

Для расчета длины абонентских линий приняты следующие данные:

- скорость передачи, кбит/с 784
- линейный код 2В1Q
- рабочая частота, кГц 150,0
- максимальное затухание линии, дБ 31,0
- коэффициент затухания цепи на частоте 150 кГц, дБ 4,8

Расчет применения оборудования FlexGain РСМ11/12 на кабеле МВПЗБШп 2×2×0,64. Для среднестатистических параметров кабеля при максимальном затухании в линии

$$A_0 = 25,7 + 31 + 3 = 59,7 \text{ дБ};$$

тогда $\ell = (59,7 - 25,7 - 3)/4,8 = 6,45 \text{ км}$.

Требования к A_0 для различных протяженностей линии приведены в табл. 13.9 и на рис. 13.6.

Таблица 13.9. Протяженность МВПЗБШп 2×2×0,64

Длина линии, км	1	2	3	4	5	6	7
Рабочее затухание, дБ	4,8	9,6	14,4	19,2	24	28,8	33,6
Требования к A_0 , дБ	33,5	38,3	43,1	47,9	52,7	57,5	62,3

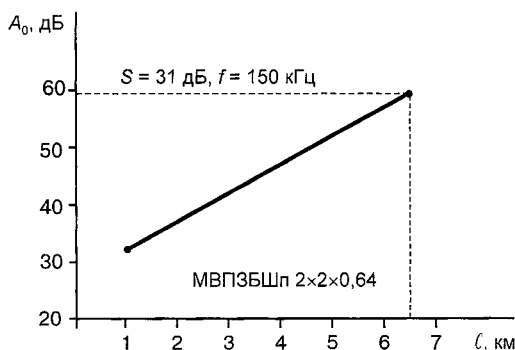


Рис. 13.6. Расчетная величина требуемого переходного затухания между цепями на ближнем конце линии из кабеля МВПЗБШп 2×2×0,64 при уплотнении оборудованием FlexGain РСМ11/12

При определении требований к величине A_0 используют среднестатистические значения параметров. В табл. 3.10, 3.11 приведены параметры передачи и влияния малопарных кабелей МВПЗБШп 3×2×0,64; 5×2×0,64 и 10×2×0,64.

Таблица 13.10. Усредненные значения параметров передачи цепей кабеля МВПЗБШп

Параметр	Частота, кГц													
	1,0	2	4	8	16	32	64	128	160	256	352	512	1024	2048
α , дБ/км	0,9	1,5	2,0	2,7	3,2	3,8	4,3	5,0	6,0	6,9	8,2	10	11	14,6
$ Z_v $, Ом	728	463	330	239	182	153	141	138	136	135	133	132	131,5	129
$-\varphi$, град.	44,0	42,0	40	35,5	27,9	18,5	10,8	6,6	6,0	4,5	3,7	2,3	1,7	1,5
β , рад/км	0,06	0,1	0,17	0,33	0,74	1,3	2,5	4,7	6,3	9,0	12,6	18,0	35,6	69,9

Таблица 13.11. Среднестатистические значения параметров влияния между цепями в кабеле МВПЗБШп

Параметр, дБ	Частота, кГц													
	1,0	2	4	8	16	32	64	128	160	256	352	512	1024	2048
A_0	99	97,0	93,0	91,0	86,7	81,5	76,8	69,3	66,0	64,2	64,9	62,8	56,4	54
σ	7,0	7,0	7,0	6,4	6,1	4,3	7,5	5,2	5,0	4,8	5,6	4,6	5,0	4,3
A_l	99,0	97,9	95,0	94,0	90,8	86,3	84,1	82,6	81,0	80,6	80,0	77,0	72	70
σ	5,7	5,0	4,9	4,0	4,4	5,3	7,5	7,2	6,2	5,8	6,3	6,1	6,0	6,0

Используя вышеприведенные данные, определим требуемую величину A_0 в зависимости от длины и количества цепей в кабеле, оборудованных оборудованием FlexGain PCM 11/12.

В табл. 13.12 и на рис. 13.7 приведены результаты расчета $A_0 = f(\ell)$.

Таблица 13.12. Результаты расчета $A_0 = f(\ell)$

Длина линии, км		1	2	3	4	5	6
Рабочее затухание, дБ		5,8	11,6	17,4	23,2	29,0	34,8
Требования МВПЗБШп к A_0 , дБ	3x2x0,64	31,5	37,3	43,1	48,9	54,7	60,5
	5x2x0,64	38,7	44,3	50,1	55,9	61,7	67,5
	10x2x0,64	41,7	47,3	53,1	58,9	64,7	70,5

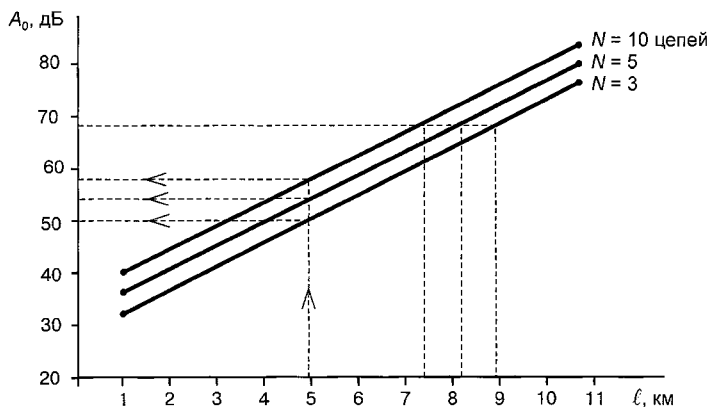


Рис. 13.7. Расчетная величина требуемого переходного затухания между цепями на ближнем конце для линий из кабеля МВПЗБШп при уплотнении оборудованием FlexGain PCM11/12

13.5. Применение оборудования FlexGain PCM 4d на кабеле МВПЗБШп

Рассмотрим область применения современного оборудования цифрового уплотнения FlexGain PCM 4d на новой конструкции цифровых кабелей местной связи типа МВПЗБШп. Основные особенности оборудования FlexGain PCM 4d:

- подключение до четырех абонентов по одной абонентской линии;
- кодирование каждого канала алгоритмом ИКМ со скоростью преобразования 64 кбит/с;
- линейное кодирование по технологии ТС-РАМ;
- сопротивление цепи абонентской линии ($R_{\text{шлейфа}}$) не более 1150 Ом.

В отличие от систем уплотнения предыдущего поколения в FlexGain PCM 4d не используется компрессия речевого канала, каждый канал передается методом ИКМ-кодирования со скоростью преобразования 64 кбит/с. Таким образом, кроме обычного телефонного разговора, по образованным системой FlexGain PCM 4d каналам может осуществляться передача данных с максимально возможной скоростью для модема или факса. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 13.13.

Таблица 13.13. Исходные данные для расчетов

№ п/п	Параметр	Величина
1	Число телефонных каналов на одной абонентской линии	4
2	Информационная скорость передачи, кбит/с	336,0
3	Линейный код	ТС-РАМ
4	Сопротивление цепи линии (шлейф), Ом, не более	1150,0
5	Рабочая частота, кГц	150,0
6	Максимальное затухание линии на частоте 63 кГц, дБ	55,0
7	Коэффициент затухания цепи кабеля МВПЗБШп на частоте 150 кГц, дБ/км	2,7

Определим требования к переходному затуханию между цепями на ближнем конце линии из кабелей МВПЗБШп 2×2×0,64; 3×2×0,64; 5×2×0,64 различной протяженности. Поскольку в оборудовании FlexGain PCM 4d применяется код ТС-РАМ величина A_0 исчисляется на частоте 150 кГц по формуле

$$A_0 = 29 + \alpha \ell + 10 \lg N.$$

В табл. 13.14 приведены результаты расчета A_0 в зависимости от протяженности линии для различной емкости кабеля МВПЗБШп при уплотнении оборудованием FlexGain PCM 4d.

Таблица 13.14. Требования к переходному затуханию между цепями линий из кабеля МВПЗБШп, оборудованных устройством FlexGain PCM 4d

Протяженность линии, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рабочее затухание на частоте 150 кГц, дБ	5,2	10,4	15,6	20,8	26	31,2	36,4	41,6	46,8	52
Требования к A_0 , дБ	Емкость кабеля									
	2×2	37,2	42,4	47,6	52,8	58,0	63,2	68,4	73,6	78,8
	3×2	39,0	44,2	49,4	54,6	59,8	65,0	70,2	75,4	80,6
	4×2	40,2	45,4	50,6	55,8	61,0	66,2	71,4	76,6	81,8
	5×2	41,2	46,4	51,6	56,8	62,0	67,2	72,4	77,6	82,8

На рис. 13.8 приведены типовые схемы организации связи с применением указанного оборудования.

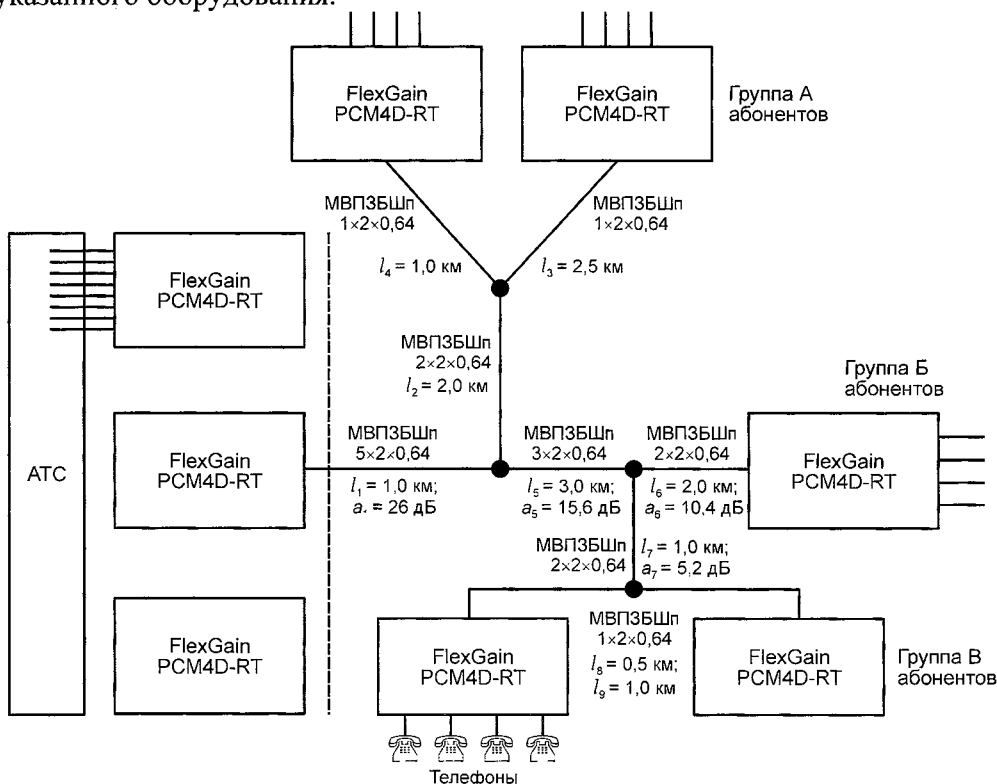


Рис. 13.8. Схема организации связи на малопарных кабелях типа МВПЗБШп с применением оборудования FlexGain PCM 4d

В табл. 13.15 приведены распределения рабочего затухания по участкам сети.

Таблица 13.15. Распределения рабочего затухания ($f = 150$ кГц) по участкам сети

Обозначение участка	Марка кабеля	Протяженность, км	Рабочее затухание участка a_p , дБ	Рабочее затухание и протяженность линии до удаленного абонента
<i>Группа абонентов А</i>				
ℓ_1	МВПЗБШП 5×2×0,64	5,0	26	$\alpha_p = 54,6$ дБ $\ell = 10,5$ км
ℓ_2	МВПЗБШП 2×2×0,64	2,0	10,4	
ℓ_3	МВПЗБШП 1×2×0,64	2,5	13,0	
ℓ_4	МВПЗБШП 1×2×0,64	1,0	5,2	
<i>Группа абонентов Б</i>				
ℓ_1	МВПЗБШП 5×2×0,64	5,0	26,0	$\alpha_p = 52,0$ дБ $\ell = 10,0$ км
ℓ_5	МВПЗБШП 3×2×0,64	3,0	15,6	
ℓ_6	МВПЗБШП 1×4×0,64	2,0	10,4	
<i>Группа абонентов В</i>				
ℓ_1	МВПЗБШП 5×2×0,64	5,0	26,0	$\alpha_p = 52,0$ дБ $\ell = 10,0$ км
ℓ_5	МВПЗБШП 3×2×0,64	3,0	15,6	
ℓ_7	МВПЗБШП 2×2×0,64	1,0	5,2	
ℓ_8	МВПЗБШП 1×4×0,64	0,5	2,6	
ℓ_9	МВПЗБШП 1×4×0,64	1,0	5,2	

Схема организации сети абонентского доступа приведена на рис. 13.9.

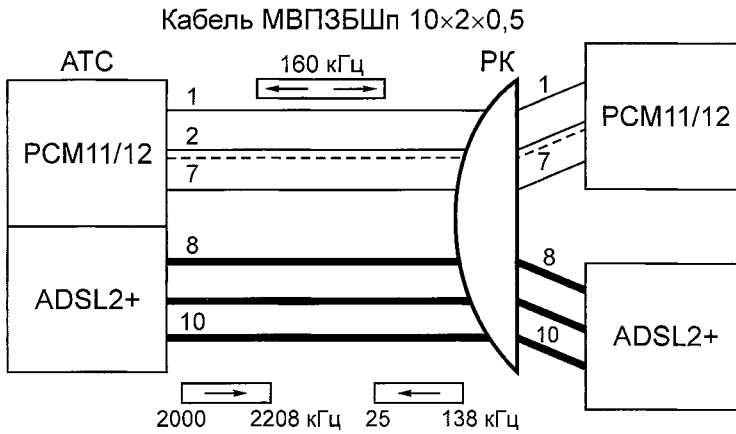


Рис. 13.9. Схема сети абонентского доступа:

PCM 11/12 — симметричная аппаратура;

ADSL2+ — асимметричная аппаратура;

ПК — распределительная коробка

Заключение

Итак, завершено изложение основной идеи книги: кабели СКС и кабели для цифровых сетей абонентского доступа — общее и различное.

В 13 главах книги авторы попытались разобраться в этом, представить читателю свое понимание, сформулировать собственную точку зрения.

Работая над книгой, мы задавали себе все новые и новые вопросы. Например, почему внутриофисные сети интеллектуальных зданий называются «структурированными»? Только потому, что они строятся по строго регламентированным принципам — структурам?

Но ведь сети связи ЕАСС (ЕСЭ РФ) тоже имеют свою структурированную систему — принцип построения, в состав которой входят и локальные сети.

Возникает много вопросов по выбору систем кодирования в оборудовании. Понятно, что развитие СКС проходило в период, когда царствовали коды из «прямоугольных» импульсов. Отсюда и обеспечение больших скоростей за счет расширения спектра частот до сотен мегагерц. А сейчас широко используются более устойчивые и экономичные коды (ТС-РАМ, DMT, VDSL), и главное, требующие меньшего диапазона частот среды передачи. Но это мысли вслух и тема для дискуссии.

Работая над терминологией мы еще и еще раз проанализировали определения, принятые в литературе по СКС. И как отмечает С.А. Попов (Вестник связи. № 5. 2003), они являются искаженными «кальками» с англоязычных переводов. Может быть специалистам по СКС и связистам следует сесть за стол переговоров и выработать хотя бы словарь переводов терминов?

В предлагаемой книге мы попытались «навести мосты» единого понимания проблемы кабелей СКС и широкополосного доступа и их применения. Ведь их конструкции, с точки зрения среды передачи, значительно превосходят кабели связи.

Не затрагивая рассмотрение диапазона частот СКС, авторы показали их преимущество для диапазона частот широкополосного доступа на абонентских сетях («последняя миля») на частотах до 2,3 (4,0) МГц.

К основным особенностям кабелей широкополосного доступа (КШД) относится использование шагов скрутки пар в кабелях, применяемых в СКС. Уделяя этому большое внимание, мы проанализировали применение новых материалов и технологических процессов изготовления кабелей.

Предложены универсальные конструкции кабелей, которые могут функционировать как на сетях СКС, так и на сетях широкополосного доступа.

При этом разработанные кабели должны соответствовать требованиям как сетей СКС, а также цифровых сетей абонентского доступа ЕСЭ.

Кабели СКС КШД — универсальные кабели цифровых систем передачи. В чем их универсальность? Область применения: от «последнего дюйма»

через тракт «последней мили», транспортную цифровую сеть на междугородные, международные линии и снова: транспортная цифровая сеть — «последняя миля» и «последний дюйм» — структурированная кабельная система.

В результате — прозрачная среда передачи инфокоммуникационных сетей: телефон, факс, широкополосный доступ, Интернет, телевидение по запросу... и все это на сетях широкополосного доступа.

Мы не противопоставляем «медь» «оптике». Каждая технология занимает свое место.

Волоконно-оптическая стратегия как генеральное направление сетей «рвется» к абоненту. Но «медь» еще долго будет работать как среда передачи инфокоммуникационных сетей. Оптимальное использование кабельных линий с медными жилами с применением цифровых систем уплотнения оборудования широкополосного доступа та задача, которую авторы книги попытались решить. Универсальные КШД — единый подход для конструкторов кабельной промышленности, проектировщиков сетей связи, строителей и работников эксплуатационных служб линий ЕСЭ.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

И вот КС и СКС и КШД
 Ворвались в транспортные сети...
 И на «последней миле», и... везде
 Создали в ЕСЭ для меди рейтинг.
 Диапазон частот? Уж нет ему предела.
 От сотни бод до тысяч мегабит
 По паре медной кабельного тела
 Поток без искажения летит.
 Наш кабель — «коммунальная квартира».
 Жильцы — содружество из DSL
 Должны в ней проживать в согласии и мире,
 Не выходя за шумовой барьер.
 Код DMT, код CAP и TC-PAM отныне
 Без затухания, переходных преград
 Распространяются по линии —
 Предел ограничений снят.
 Различий нет и в терминах по связи —
 Переходное затухание — значит *NEXT*.
 Не будем различать разнообразия,
 У нас им просто места нет.

Один подход! Один процесс —
Потерь «возвратных» нет возврата.
Ведь это отражение от мест
Сопровождений волновых неоднократно.
 А норма что? Параметры влияний?
 Переходное затухание? ЭМС?
 Отсутствие помех — установление граней.
 Величина A_0 или просто *NEXT*.
Наш кабель КШД снимает все запреты.
Включай любую DSL
Нам не страшны влияния беды,
Для кодов DMT, VDSL — открыта дверь.

Список сокращений

2B1Q	2 Binary, 1 Quaternary — линейный код, в котором два бита данных кодируются одной четырехуровневой посылкой
ACR	Attenuation to Cross-Talk Ratio — защищенность на ближнем конце
ADSL	Asymmetric DSL — асимметричная цифровая абонентская линия
ADSL-lite	«Облегченный» вариант ADSL, не требующий разветвителя
AMI	Alternativi Mark Inversion signal — квазитроичный код
Delay	Задержка прохождения сигналов
DLC	Digital Loop Carrier — оборудование выносных концентраторов
DSL	Digital Subscriber Line, Digital Subscriber Loop — цифровая абонентская линия
ELFEXT	Equal Level for Far End Cross-Talk — защищенность от переходной помехи на дальнем конце
FEXT	Far End Cross-Talk — переходное затухание на дальнем конце
G.Lite	«облегченный» вариант ADSL; технологии ADSL, не требующие разветвителя
ITU-T	International Telecommunications Union, Telecommunication Standardization Sector — Международный союз телекоммуникаций, Сектор стандартизации электросвязи
ISDN	Integrated Services Digital Network — цифровая сеть с интеграцией служб (ЦСИС)
NEXT	Near End Cross-Talk — перекрестная помеха на ближнем конце
NRZ	Non Return to Zero — кодирование без возврата к нулю
NVP	Nominal Velocity of Propagation — нормированная скорость распространения электромагнитных волн
OAN	Optical Access Network — сеть с оптическим доступом
PON	Passive Optical Network — пассивная оптическая сеть
POTS	Plain Old/Ordinary Service — традиционный (аналоговый) телефонный сервис
PS-NEXT	Power-NEXT — суммарные двунаправленные наводки
RZ	Return to Zero — кодирование с возвратом к нулю
SDSL	Symmetric DSL — симметричная высокоскоростная абонентская линия
Skew	разброс задержек прохождения сигналов по «витым» парам
SNR	Signal-to-Noise Ratio — отношение сигнал/шум
SRL	Structural Return Loss — структурные возвратные потери
xDSL	обобщающее сокращение для всех технологий DSL

ВОЛС	волоконно-оптическая линия связи
ЕСЭ	Единая сеть электросвязи
КВМ	кроссовая внешних магистралей
КСШД	кабельная сеть широкополосного доступа
КШД	кабель широкополосного доступа
ЛВС	локальная вычислительная сеть
МСИ	межсимвольные искажения
МСС	мультисервисная сеть связи
ОУ	оконечное устройство
ПВБК	переходное влияние между цепями на ближнем конце
ПВДК	переходное влияние между цепями на дальнем конце
ПП	попутный поток
РК	распределительная коробка
РКУ	регулируемый корректирующий усилитель
РУ	решающее устройство
РШ	распределительный шкаф
СКС	структурированная кабельная система
ТПЖ	токопроводящая жила
ТЧ	тактовая частота
ТШ	тепловой шум
ЦАЛ	цифровая абонентская линия
ЦСП	цифровая система передачи
ЧПИ	чередование полярности импульсов
ЧС	четыреполюсник связи
ШБД	широкополосный беспроводной доступ
ЭМИ	электромагнитное излучение
ЭМС	электромагнитная совместимость
ЭП	элементарный пучок
ЭЧС	эквивалентный четырехполюсник связи

Издание для специалистов

Валерий Евгеньевич Власов
Юрий Алексеевич Парфенов
Леонид Григорьевич Рысин
Леонид Иосифович Кайзер

**КАБЕЛИ СКС НА СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ:
ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ**

ЛР № 065232 от 20.06.97

Подписано в печать с оригинал-макета 28.07.2006.

Формат 70×100/16. Тираж 2000 экз.

Бумага офсетная № 1. Гарнитура таймс.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,6. Зак. № 3780.

Информационно-технический центр «Эко-Трендз».

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»,
121099, Москва, Шубинский пер., 6