

Д.Я.ГАЛЬПЕРОВИЧ
А.А.ПАВЛОВ
Н.Н.ХРЕНКОВ

Радиочастотные КАБЕЛИ

РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ



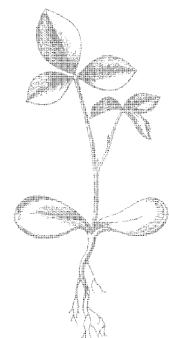
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Д.Я.ГАЛЬПЕРОВИЧ
А.А.ПАВЛОВ
Н.Н.ХРЕНКОВ

Радиочастотные КАБЕЛИ



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1990



ББК 32.843.2

Г17

УДК 621.315.2:621.396.029

Р е ц е н з е н т канд. техн. наук Д. Л. Шарле

Гальперович Д.Я. и др.

Г17 Радиочастотные кабели/ Д.Я. Гальперович, А.А. Павлов, Н.Н. Хренков. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.: ил.

ISBN 5-283-00524-0

Рассматриваются вопросы классификации, стандартизации, процедуры конструирования кабелей и технологических режимов. Описываются конструкции и основные параметры отечественных радиочастотных кабелей, области их применения, методы измерений и конструкции соединителей.

Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией радиочастотных кабелей.

Г 2202040000-359
051 (01) -90 131-89

ББК 32.843.2

Производственное издание

Гальперович Давид Яковлевич,
Павлов Анатолий Александрович,
Хренков Николай Николаевич

РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

Зав. редакцией *М.П. Соколова* Редактор *Н.И. Дорезюк*

Редактор издательства *И.Н. Суслова*

Художественные редакторы: *В.А. Гозак-Хозак, Г.И. Панфилова*

Технический редактор *Е.В. Пронь* Корректор *Л.А. Гладкова*

ИБ № 1527

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 20.02.90.
Т-06747. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,68. Усл.кр.-отт. 15,68. Уч.-изд.л. 17,15. Тираж 8500 экз. Заказ 6938.
Цена 1 р. 20 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография" Государственного комитета СССР по печати. 113054, Москва, М-54, Валовая ул., 28.

ISBN 5-283-00524-0

© Авторы, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное развитие радиоэлектроники, радиосвязи и вычислительной техники требует создания новых и модернизации существующих радиочастотных кабелей, являющихся непременным элементом радиоэлектронной аппаратуры. Именно эта связь с передовыми отраслями техники служит стимулом форсированного развития одного из наиболее наукоемких видов кабельных изделий.

Современный этап развития радиочастотных кабелей характеризуется следующим:

созданием ряда принципиально новых конструкций, в том числе для миллиметрового диапазона длин волн на основе развитой номенклатуры радиочастотных кабелей;

существенным расширением диапазона таких эксплуатационных воздействий, как частота, температура, изгибы, перемотки, значительным увеличением сроков службы;

применением ЭВМ для автоматизации проектирования, управления технологическими процессами и испытательными установками;

совершенствованием методов измерения параметров.

Одновременно с развитием кабелей усложняются процедуры проектирования и документация. Разработка современного радиочастотного кабеля в значительной мере – искусство, требующее достаточно длительной стажировки и освоения накопленных знаний и приемов.

Основные книги, которые сегодня используются специалистами по радиочастотным кабелям, это – "Радиочастотные линии передачи" [1] и "Радиочастотные кабели" [2]. По общим вопросам обычно используются работы "Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов" [3] и "Основы кабельной техники" [39], рассматривающие также и радиочастотные кабели.

Предлагаемая книга написана как пособие для специалистов, разрабатывающих или применяющих радиочастотные кабели. При этом наряду с рассмотрением традиционных вопросов достаточно подробно освещены актуальные вопросы процесса конструирования, принятия решений; приведены точные алгоритмы расчета первичных и вторичных параметров, коэффициента отражения и других параметров неоднородности. Краткая историческая справка приведена с целью выработки обоснованных прогнозов на базе предшествующего опыта. Обобщенные данные по областям применения и основным конструктивным схемам служат базой собственно конструирования. В книге впервые полностью рассмотрен весь процесс разработки с выделением многократно повторяющегося типового цикла конструирования радиочастотного кабеля.

В разделе, рассматривающем теорию и расчет электрических параметров, приведены уточненные алгоритмы для регулярных и нерегулярных линий, для высокочастотного сопротивления сплошных, многослойных и многопроволочных проводников. С целью большей систематизации материала в виде отдельного параграфа изложена расширенная методика расчетов электрических параметров. Большинство алгоритмов ориентировано на использование ЭВМ. Отдельно отмечаются алгоритмы, получившие программную реализацию.

Конструирование кабелей без надежных данных по свойствам материалов малоэффективно, особенно при повышенных требованиях к параметрам и надежности кабелей. Поэтому авторы постарались привести проверенные данные по свойствам материалов при нормальных условиях, а также в диапазоне частот и температур, характерных для условий эксплуатации радиочастотных кабелей.

Поскольку точный расчет конструкции кабелей невозможен без знания режимов изготовления, уделено внимание особенностям расчета технологических режимов.

Испытание – один из обязательных этапов конструирования. Он необходим для проверки правильности и уточнения принятых алгоритмов расчета, конструктивных исполнений и технологических режимов. В книге рассмотрены особенности измерения параметров радиочастотных кабелей, взаимосвязь конструкции кабелей с конструкцией высокочастотных соединителей. Даются сведения о радиоизмерительных приборах, используемых для исследований кабелей.

Основное внимание в книге обращено на проблемы, определяющие дальнейшее развитие радиочастотных кабелей. Она может быть полезной студентам вузов по курсам "Кабели связи" и "Основы кабельной техники".

Материал книги распределен между авторами следующим образом: Д.Я. Гальперович написал гл. 6 (кроме § 6.6) и принял участие в написании гл. 1, А.А. Павловым написан § 5.2 и гл. 3 (кроме § 3.10), Н.Н. Хренковым написаны гл. 1 (совместно с Д.Я. Гальперовичем), гл. 2, 4, 5 (кроме § 5.2), гл. 7, а также § 3.10 и 6.6. При написании § 2.4 и гл. 7 использованы материалы А.А. Павлова.

В создании книги приняли участие инженеры Б.В. Мальков, написавший § 3.9, О.М. Ковалева, написавшая часть § 3.10, и А.А. Лаптев, написавший § 3.5 и часть § 6.4.

Авторы выражают глубокую благодарность Б.Я. Бранзбургу за просмотр рукописи и ценные замечания, а также за его многолетнюю поддержку их работ.

Авторы благодарят инженеров С.К. Чернышова, А.А. Данцера, В.Г. Липскую, Т.В. Коржакову, Л.В. Савельеву за помощь в создании книги.

Замечания и пожелания по книге следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

ГЛАВА 1

НАЗНАЧЕНИЕ, РАЗВИТИЕ, ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ И МАРКООБРАЗОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

1.1. ОБЛАСТИ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

Первоначальное назначение радиочастотных кабелей – соединение передающих и приемных устройств радиолокационных станций с антennами, а также сверхвысокочастотные (СВЧ) соединения внутри станций. Со временем они получили широкое распространение и в радиоаппаратуре метрового, дециметрового и даже сантиметрового диапазонов волн: в радиорелейных станциях, в тропосферной, спутниковой и космической связь, в радиоизмерительных приборах. Практически одновременно радиочастотные кабели нашли применение для передачи коротких импульсов на расстояние до нескольких сот метров. Так, импульсы от блока синхронизации передаются во все устройства радиотехнической установки (системы), находящиеся на расстоянии до 20 м, а видеоимпульсы от приемника к индикатору – на расстоянии до 200–250 м [4].

Гибкие радиочастотные кабели, выпускающиеся наиболее массово, используются для соединения частей аппаратуры, перемещающихся относительно друг друга – в качающихся антенах, измерительных головках, выдвижных блоках. По радиочастотным кабелям передаются разнообразнейшие сигналы: от простых и узкополосных до очень сложных по структуре и широкополосных.

Радиотехническое оборудование работает обычно в диапазонах ультравысоких частот (УВЧ) и СВЧ, используя при этом относительно узкие полосы вблизи центральной частоты. Так, станции радиосвязи и радиолокации, работая на частотах от 100 МГц до 40 ГГц, занимают полосы 10–200 МГц; радиорелейные станции, работая на частотах 2, 4, 6, 8, 11, 14 ГГц, занимают полосы 0,3–0,8 ГГц. При этом применяются различные виды модуляции: частотная, импульсная, импульсно-кодовая, реже – амплитудная. Следует отметить, что радиочастотные кабели должны обладать очень хорошими характеристиками именно в рабочей полосе частот, но могут иметь несколько худшие характеристики вне ее. Этим они отличаются от кабелей связи и телевидения, которые должны иметь высокие характеристики в относительно более широкой полосе частот.

Условия монтажа и эксплуатации кабелей определяются условиями работы стационарных и подвижных радиотехнических комплексов и

систем, радиоизмерительных приборов, в том числе на кораблях и воздушных судах. Следовательно, радиочастотные кабели подвергаются тепловым, механическим и климатическим воздействиям, характерным для перечисленного оборудования. Так, кабель, подводящий СВЧ-энергию к антенне (рис. 1.1), подвергается воздействию окружающей среды, а кабели, размещенные внутри аппаратуры, — в основном тепловым воздействиям от окружающих элементов.

Некоторые типы радиочастотных кабелей нашли массовое применение для подключения телевизоров к приемным антеннам и в системах коллективного приема телевидения (СКПТ). В последнее время строятся крупные СКПТ, обеспечивающие подачу сигналов от одной антенны к группе домов или даже на микрорайон [5].

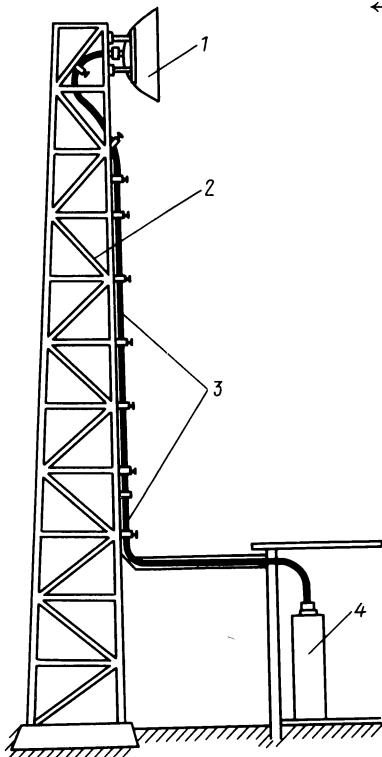
По кабелям СКПТ передаются частоты 30–300 МГц, при этом используются два поддиапазона частот: 48,5–100 МГц (телевизионные каналы с 1 по 5) и 174–230 МГц (телевизионные каналы с 6 по 12) [6]. Телевизионные сигналы подобны сигналам связи и в основном являются амплитудно-модулированными. Нижняя граница частотного диапазона кабелей для СКПТ стыкуется с верхней границей частотного диапазона коаксиальных кабелей связи. По условиям прокладки, монтажа и эксплуатации кабели для СКПТ и кабели связи сходны. Следовательно, кабели для СКПТ как бы являются связующим звеном между кабелями связи и радиочастотными. Характерная схема применения кабелей в системах коллективного приема телевидения показана на рис. 1.2.

Все большее применение находят радиочастотные кабели в качестве линий связи электронных вычислительных машин (ЭВМ). При этом им передаются не частотные сигналы, а цифровые в виде немодулированных импульсов, каждый из которых несет один бит информации, или сложных последовательностей импульсов в полосе частот 100 Гц . . . 200 МГц [7, 8].

Кабели для ЭВМ характеризуются специфическими параметрами: сопротивлением проводников на постоянном токе, временем установления переходной характеристики, числом передаваемых однобитовых сигналов в единицу времени, дисперсией времени задержки импульсов. Однако в технической документации на радиочастотные кабели импульсные параметры не нашли отражения. В последнее время радиочастотные кабели начали использоваться в сетях ЭВМ [9].

В ЭВМ кабели обеспечивают внутристоечные, межстоечные и межшкафные связи, а также связь с удаленными терминалами. При организации сетей ЭВМ кабели прокладываются как внутри зданий, так и между зданиями. В связи с большим числом параллельных цепей в ЭВМ характерно применение многокоаксиальных конструкций.

Таким образом, три наиболее массовые группы кабелей, которые в СССР относятся к радиочастотным (применяются в радиотехнических устройствах, в СКПТ и ЭВМ), в значительной мере различаются по сво-



← Рис. 1.1. Пример использования радиочастотного кабеля в качестве фидерного тракта:

1 – антенна; 2 – мачта; 3 – радиочастотный кабель; 4 – радиотехническое оборудование

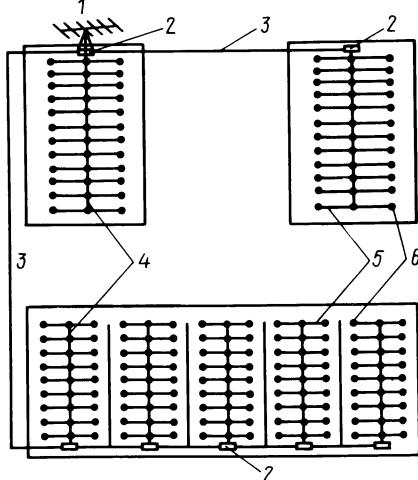


Рис. 1.2. Сеть коллективного приема телевидения в районе многоэтажной застройки:

1 – приемная антенна; 2 – усилители; 3, 4, 5 – магистральные, распределительные и абонентские кабели; 6 – квартиры

им параметрам, условиям монтажа и эксплуатации, а также по частотным диапазонам применения.

Следует упомянуть об использовании радиочастотных кабелей в качестве главного компонента отдельных блоков радиоаппаратуры, в основном линий задержки и комплектных кабельных сборок.

1.2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ В СССР

История развития отечественных радиочастотных кабелей насчитывает около пятидесяти лет. Их появление вызвано развитием радиолокационной техники и техники связи СВЧ-диапазона и относится к началу 40-х годов.

В 1942 г. на заводе "Электропровод" в Москве были начаты работы по созданию радиочастотных кабелей и организации их производства [10]. Для изоляции первых радиочастотных кабелей была применена

смесь из каучука "белый креп" и церезина. Использовались эти кабели в наземных радиолокаторах при температурах $\pm 40^{\circ}\text{C}$. Затем на заводе "Электропровод" был организован специальный цех высокочастотных кабелей, а спустя некоторое время радиочастотные кабели были выделены в специальную группу [11].

Длительное время основным материалом для изоляции радиочастотных кабелей был кабельный полиэтилен, представляющий собой смесь 65% полиэтилена и 35% поливинилхлорида. Позднее для повышения механической устойчивости и расширения диапазона рабочих температур в ряде конструкций был применен чистый стабилизированный полиэтилен высокого давления [12]. Внедрение нового материала сопровождалось освоением технологии экструдирования полиэтилена и разработкой необходимого технологического оборудования и инструментов.

Следующей стадией развития материалов для изоляции явилось использование в начале 50-х годов политетрафторэтилена (фторопласт-4) и освоение технологии его переработки, что позволило повысить рабочую температуру до 200°C и удовлетворить требования авиационной и ракетной техники.

К середине 50-х годов были созданы и серийно выпускались заводами две основные группы радиочастотных кабелей [4, 12]: с изоляцией из полиэтилена — на рабочие температуры до 85°C и из политетрафторэтилена — на рабочие температуры до 200°C . К концу 50-х годов завершился первый этап с появлением и начальным развитием этого вида кабельной продукции.

Несколько позднее, в начале 60-х годов, создана унифицированная серия миниатюрных кабелей. К концу 60-х годов разработаны полужесткие кабели с гофрированными внешними проводниками, а вслед за ними — миниатюрные со сплошными гладкими внешними проводниками. В конце 60-х — начале 70-х годов появились регулярные и фазостабильные радиочастотные кабели [1, 13]. В это же время получили развитие миниатюрные кабели, предназначенные для ЭВМ. В конце 70-х — начале 80-х годов разработана серия кабелей для системы коллективного приема телевидения, технология их производства и первая частично автоматизированная система контроля качества выпускаемой продукции [1, 5].

С середины 60-х годов велись исследования и разработки радиочастотных кабелей с использованием эффекта сверхпроводимости [14, 15].

Освоение космоса и криогенной техники привело к расширению рабочих температур сначала до -200 , а затем до -269°C . Посадка космических аппаратов на Венеру вызвала необходимость создания кабелей, работоспособных при $+500^{\circ}\text{C}$. В настоящее время радиочастотные кабели работают от гелиевых температур (-269°C) до венерианских (500°C) и даже более высоких.

Стандартизация. Первый этап развития радиочастотных кабелей характеризуется разработкой все новых и новых конструкций для целевого назначения. Если в 1951 г. широко применялось около 30 марок [11], то к 1959 г. в СССР было разработано уже около 100 марок радиочастотных кабелей, но с очень низким уровнем унификации. Необходимость в стыкующихся, взаимозаменяемых блоках радиоаппаратуры поставила на повестку дня задачу разработки стандарта на радиочастотные кабели с нормированными требованиями к размерам, конструкции, параметрам, условиям эксплуатации и методикам испытаний. Причем требовались не отдельные стандарты, а построенная на общей идеологии система стандартизации для всего семейства радиочастотных кабелей.

В СССР такая работа была выполнена в 1959–1960 гг. на основе рекомендаций Международной электротехнической комиссии (МЭК) и завершилась разработкой нормали, включающей общие технические требования на радиочастотные кабели и частные технические условия на отдельные марки. В ходе разработки нормали появилась возможность сократить номенклатуру выпускаемых кабелей, выделить перспективные конструкции, а также марки кабелей, не рекомендуемые для применения в новой аппаратуре и снимаемые с производства.

Логичность и внутренняя целесообразность нормали позволили в течение двух-трех лет отказаться от старой документации. В дальнейшем после уточнений и дополнений нормаль явилась основой для создания ГОСТ на радиочастотные кабели, обобщивших достижения 60-х годов и новые рекомендации МЭК.

В конце 60-х – начале 70-х годов появились радиочастотные кабели нового типа – с нормируемыми в полосе частот коэффициентами затухания, отражения и фазы.

Поколения радиочастотных кабелей. Рассмотренные этапы развития радиочастотных кабелей послужили основой для выделения трех поколений радиочастотных кабелей [16]. Первый этап развития радиочастотных кабелей, от момента появления до начала этапа стандартизации (1942–1960 гг.), определяется как период кабелей первого поколения. Отдельные марки кабелей первого поколения выпускались еще не так давно, параллельно с кабелями второго поколения, но только для комплектации разработанной ранее аппаратуры. Таким образом, прекращение выпуска кабелей первого поколения происходило в период развития второго.

Первое поколение новых изделий появляется одновременно с возникновением новой отрасли техники – техники сверхвысоких частот. За время жизни первого поколения происходит становление данного вида изделий, быстрый численный рост типов и конструкций (марко-размеров), выявляются многие трудности и противоречия. Основное внимание уделяется поиску и освоению соответствующих материалов, разработке конструкций под конкретные применения и методов их расчета, освоению новых технологических процессов, методам измерений параметров.

Наконец, когда развитие радиочастотных кабелей достигло уровня, при котором первостепенную роль начали играть вопросы стандартизации конструкций, методов измерений и основной нормативной документации, то идеи стандартизации и единого подхода к конструированию явились фундаментом развития радиочастотных кабелей второго поколения.

Сумма знаний, накопленных на первом этапе, обобщенных и систематизированных, позволила выработать и узаконить ряд требований в виде ГОСТ. Наличие единых технических условий и единых методов испытаний обеспечило в значительной степени стандартизацию конструкций и позволило приступить к унификации технологических режимов. Таким образом, появилось второе поколение радиочастотных кабелей. Представление о состоянии радиочастотных кабелей этого поколения дают [1, 2]. Основной период существования кабелей второго поколения приходится на 1960–1978 гг.

В течение последних двух десятилетий развивалось третье поколение радиочастотных кабелей, характеризующееся рядом свойств, отличающих их от изделий второго поколения [16].

Новые параметры, которыми отличаются радиочастотные кабели третьего поколения, интенсивно изучались уже в 1965–1970 гг. на кабелях второго поколения. С использованием полученных в этих исследованиях научных данных и были созданы новые типы радиочастотных кабелей [5, 13, 15, 17].

Первые марки кабелей третьего поколения — кабели с нормируемым в полосе частот коэффициентом отражения — появились и начали промышленно выпускаться в конце 60-х годов. Одновременно в ГОСТ на радиочастотные кабели были внесены соответствующие дополнения в разделы требований и методов испытаний. Развернулись работы по исследованию и внедрению новых материалов, углублению теоретической базы, широкому применению при исследованиях полосовых методов измерений, нормированию по коэффициентам фазы и отражения, расширению температурного и частотного диапазонов использования, оформлению единых серий. Созданы технологическое оборудование и инструмент для калибровки изоляции, для наложения сварных гофрированных и гладких трубчатых проводников.

Модель поколений позволяет проводить укрупненную качественную оценку научно-технического уровня кабелей на различных стадиях жизненного цикла — при проведении исследований, разработок, в процессе серийного производства, а также при разработке проектных заданий на реконструкцию и создание новых мощностей. Отталкиваясь от принятой в мировой практике градации поколений техники, мы можем выявить отдельные признаки появления четвертого поколения радиочастотных кабелей. В чем они проявляются?

Конструирование — применение ЭВМ при разработке конструкций и создание подсистем автоматизированного проектирования, на основе

которых должна быть создана комплексная система автоматизированного проектирования (САПР); создание конструкций кабелей, ориентированных на автоматизированное производство.

Технология – появление автоматизированных технологических линий, совмещающих несколько ранее разрозненных операций, таких, как наложение внешнего проводника и оболочки, причем эти линии управляются от микроЭВМ и осуществляют непрерывный контроль кабеля в ходе изготовления.

Измерения – применение радиоизмерительных приборов и испытательных стендов, оснащенных микропроцессорами.

Документация – оформление и редактирование документации, а также хранение справочной информации с помощью вычислительной техники и банков данных.

1.3. ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ И КОДИРОВАНИЯ

Стандартами и нормативными документами радиочастотные кабели выделены в самостоятельный вид кабельной продукции наряду с силовыми кабелями, кабелями связи, монтажными проводами и т.п.

Конструктивные исполнения радиочастотных кабелей определяются структурой электромагнитного поля, а в пределах одной структуры – конструкцией отдельных элементов кабеля и их сочетаниями.

По конфигурации поперечного сечения радиочастотные кабели могут быть разделены на четыре подвида: коаксиальные, спиральные, полосковые и симметричные (в том числе симметричные неэкранированные, симметричные экранированные, двухкоаксиальные).

Упрощенные конструктивные исполнения перечисленных кабелей показаны на рис. 1.3. Наибольшее распространение получили коаксиальные конструкции. Симметричные, спиральные и полосковые составляют около 10% всей номенклатуры радиочастотных кабелей и применяются в узко специализированной аппаратуре.

В ГОСТ на радиочастотные кабели полосковые конструкции еще не приводятся, однако такая классификация предусмотрена частными техническими условиями.

Из конструктивных признаков наибольшее значение имеют гибкость, сплошность изоляции, теплостойкость.

Гибкость – это важный монтажный и эксплуатационный параметр, который в основном определяется конструкцией проводников. Различают полужесткие, гибкие и особо гибкие кабели. Полужесткими называют кабели со сплошным (монолитным или сварным) металлическим внешним проводником, который выполняется гладким или гофрированным (рис. 1.4).

Гибкими называют кабели, внешний проводник которых выполнен в виде оплетки или повива плоских или круглых проволок (рис. 1.5). Взаимная подвижность проволок внешнего проводника и обеспечивает

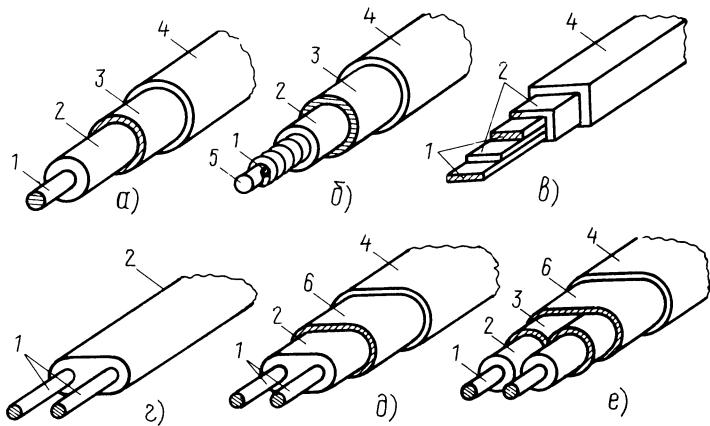


Рис. 1.3. Конструктивные схемы радиочастотных кабелей:

а – коаксиальный; *б* – спиральный; *в* – полосковый; *г* – симметричный неэкранированный; *д* – симметричный экранированный; *е* – симметричный двухкоаксиальный; 1 – внутренний проводник (проводники); 2 – изоляция; 3 – внешний проводник; 4 – оболочка; 5 – диэлектрический или магнитодиэлектрический стержень; 6 – экран

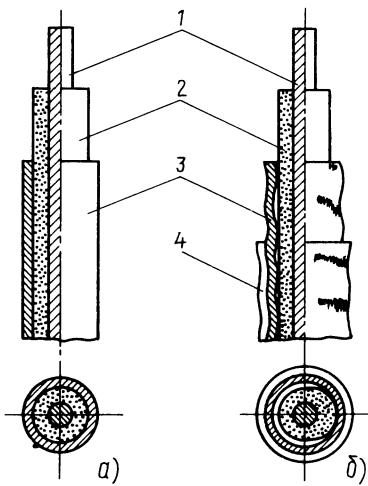


Рис. 1.4. Конструктивные схемы полужестких коаксиальных радиочастотных кабелей:

а – классический, с гладким внешним проводником; *б* – с гофрированным внешним проводником; 1 – внутренний проводник; 2 – изоляция; 3 – внешний проводник; 4 – оболочка

гибкость. Для повышения гибкости и надежности монтажа внутренний проводник гибких кабелей в большинстве случаев выполняется многопроволочным скрученным (рис. 1.5). Такие кабели получили наибольшее распространение.

Особо гибкими называют кабели, предназначенные для эксплуатации с большим числом изгибов или перегибов, зачастую по радиусу, сравнимому с диаметром кабеля. Имеет значение также усилие изгиба, выражаемое через момент сопротивления изгибу. Все элементы особо гибких

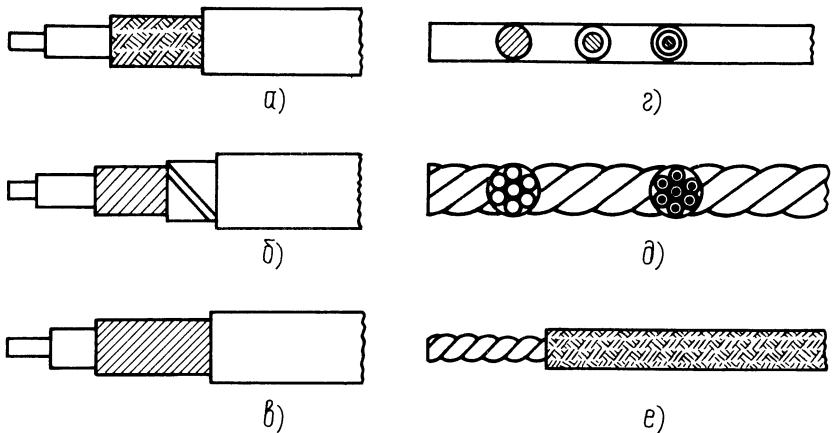


Рис. 1.5. Конструкции внешних и внутренних проводников гибких коаксиальных кабелей:

внешний проводник в виде:
 а – оплетки; б – повива плоских проволок; в – повива круглых проволок,
 внутренний проводник: г – однопроволочный (моно-, би- или триметаллический);
 д – скрученный (из монометаллических или биметаллических проволок); е – плетеный (скрученный сердечник покрыт металлической оплеткой)

кабелей выполняют таким образом, чтобы обеспечить их взаимную подвижность и стойкость к циклическим изгибам.

Все большее распространение получают кабели, которые следует отнести к полугибким. Внешний проводник полугибких кабелей выполняется из продольно наложенных проволок, металлической фольги или двух-, трехслойной металлоопластмассовой ленты (рис. 1.6).

Конструкция по схеме рис. 1.6, а наиболее близка к полужесткой классической. Достаточная гибкость обеспечивается только применением металлоопластмассовой фольги или ленты. В конструкции по схеме рис. 1.6, б гибкость обеспечивается за счет гофрирования металлической фольги, используемой для внешнего проводника. Однако дренажная проволока, обеспечивающая электрический контакт в местах разрыва фольги, нарушает цилиндричность внешнего проводника. В конструкции по схеме рис. 1.6, в этот недостаток уменьшен за счет расположения дренажной проволоки поверх внешнего проводника. Металлоопластмассовая лента внешнего проводника охватывает изоляцию и дренажную проволоку так, что в поперечном сечении напоминает цифру восемь. Конструкция по схеме рис. 1.6, г позволяет повысить по сравнению с оплеткой скорость наложения многопроволочного внешнего проводника, но не имеет достаточной гибкости. Предварительное гофрирование проволок перед продольным наложением (схема рис. 1.6, д) частично устраняет этот недостаток.

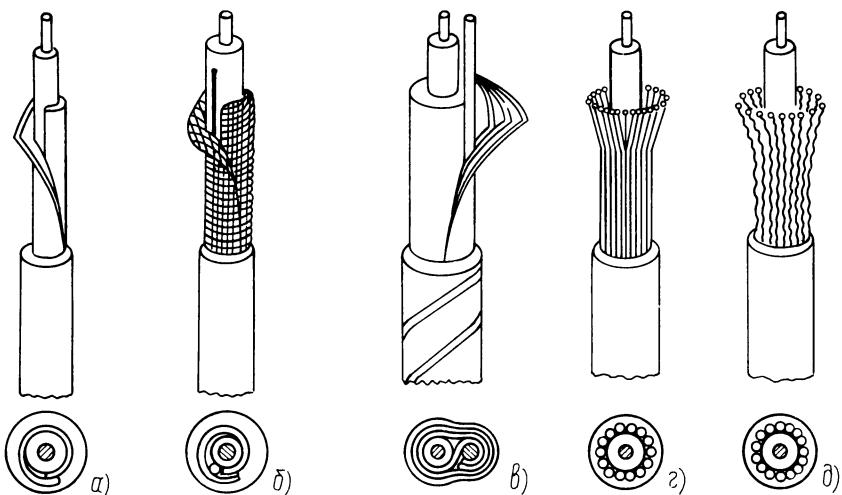


Рис. 1.6. Конструкции внешних проводников полугибких радиочастотных коаксиальных кабелей:

а – продольная гладкая фольга; *б* – продольная гофрированная металлическая лента с дренажной проволокой; *в* – восьмеркообразная продольная металлопластмассовая лента с внешней дренажной проволокой; *г* – продольно уложенные проволоки; *д* – предварительно гофрированные проволоки, уложенные продольно

Отметим, что в радиотехнике используются линии передачи, называемые "жесткими", которые монтируются в том виде, как изготовлены, и не предназначаются для изгибов. "Жестких" кабелей не бывает.

Сплошность изоляции. Диапазон частот, в котором работают радиочастотные кабели, таков, что потери в изоляции становятся сравнимыми с потерями в проводниках. Для уменьшения потерь применяются различные виды несплошной изоляции, состоящей из диэлектрика и воздуха. Несплошная изоляция находит применение также в особо гибких кабелях. По сплошности изоляцию, согласно ГОСТ и публикациям МЭК, подразделяют на сплошную, полу воздушную и воздушную.

Сплошной называется такая изоляция, у которой все пространство между внутренним и внешним проводником (или экраном) заполнено сплошным диэлектриком или обмоткой из изоляционных лент. Сплошная изоляция может быть однородной или комбинированной; последняя включает два или более концентрических плотно прилегающих слоя, обладающих различными свойствами (Публикация МЭК 96-1).

Воздушной изоляцией называется такая, у которой диэлектриком является воздух, за исключением участков, занятых изолирующим материалом, расположенным на внутреннем проводнике через равные интервалы или спирально наложенным в виде лент и (или) корделя. Для этого

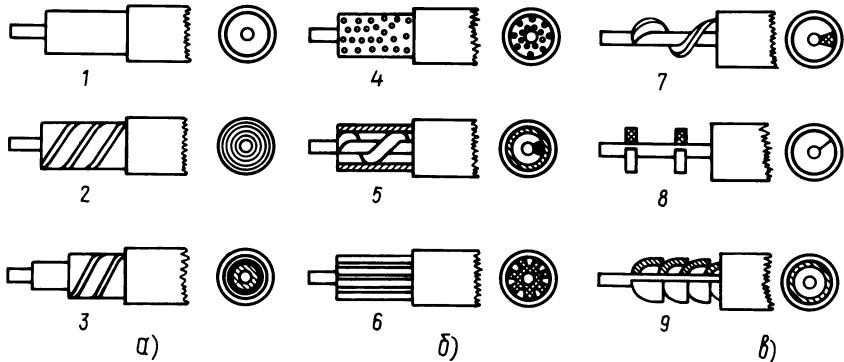


Рис. 1.7. Основные типы изоляции радиочастотных кабелей:

а – сплошная; *б* – полувоздушная; *в* – воздушная; 1 – монолитная; 2 – ленточная; 3 – двухслойная; 4 – пористая; 5 – кордально-трубчатая; 6 – шлипованная; 7 – кордельная; 8 – шайбовая; 9 – колпачковая

типа изоляции характерно то, что вне участков с изолирующим материалом можно пройти от внутреннего проводника к внешнему проводнику (или экрану) без пересечения слоя сплошного диэлектрика.

Полувоздушной называется изоляция с конструкцией, промежуточной между воздушной и сплошной и отличающейся от предыдущих тем, что в ней невозможно пройти от внутреннего проводника к внешнему проводнику (или экрану) без пересечения по крайней мере одного слоя сплошного диэлектрика. К полувоздушной относят пористую, кордально-трубчатую, баллонную и изоляцию в виде шлифованной трубы (рис. 1.7).

Теплостойкость кабеля в большинстве случаев определяется максимальной рабочей температурой пластмасс, применяемых в качестве изоляции или оболочки. Однако в полужестких кабелях со сплошной изоляцией теплостойкость устанавливают исходя из допустимых механических напряжений, возникающих в сплошном внешнем проводнике при нагреве и не приводящих к нарушению его целостности.

Кабели разделяют на три категории теплостойкости: обычную – для температур до 125°C включительно; повышенную – для температур от 125 до 250°C включительно; высокую – для температур выше 250°C. Помимо теплостойкости в ряде случаев существенными оказываются минимальные рабочие температуры, особенно в случае контакта с криогенными жидкостями. Кабели, предназначенные для работы при температурах –150°C и ниже, рекомендуется называть криогенными. Сверхпроводящие кабели, работающие при гелиевых температурах, т.е. вблизи абсолютного нуля, можно рассматривать как особый случай криогенных кабелей.

Таблица 1.1. Типовые конструктивные исполнения радиочастотных кабелей

Изоляция	Исполнение (гибкость) внеш						
	Гибкие						
	оплеточные			оплетка- изоля- ция—оп- лётка	повив плоских провод- лок	повив круглых проводов	спираль- ный
Сплошная	x	x	x	x	x	x	x
Полувоздуш- ная	x	x	x	x	x	x	x
Воздушная	—	—	—	—	—	—	—

На основе высказанных соображений можно составить таблицу типовых конструктивных исполнений радиочастотных кабелей (табл. 1.1). Сверху таблицы указаны исполнения внешних проводников (экранов), определяющие гибкость кабеля, а сбоку — исполнения изоляции с учетом сплошности. На пересечении столбцов и строк отмечены встречающиеся в практике семейства конструктивных исполнений.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ И КОДИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Существующие системы. Радиочастотные кабели, как и другие кабельные изделия, относятся к комплектующим, которые реализуют свое назначение только в составе более сложных изделий (в нашем случае в составе радиоэлектронной аппаратуры). Назначение и условия эксплуатации аппаратуры, использующей радиочастотные кабели, весьма разнообразны, и обеспечить удовлетворение всего разнообразия потребностей узкоспециализированными кабелями невозможно. Выходом в этом случае может служить создание стандартизованных серий, построенных на единой научно-технической основе. Одним из важных элементов научно-технической основы являются системы классификации, кодирования и маркообразования.

Наиболее известной является система классификации радиочастотных кабелей, принятая в ГОСТ 11326.0-78 и построенная по фасетному методу. В ней деление множества существующих кабелей производится по некоторым самостоятельным признакам: конструктивному расположению проводников, продиктованному структурой электромагнитного поля, волновому сопротивлению, диаметру по изоляции, теплостойкости и конструктивному исполнению изоляции. Однако эти признаки недостаточны для выявления основных, а тем более второстепенных особенностей конкретного кабеля. Фасетный метод не позволяет выявить

них проводников

Полужесткие				Полугибкие				
гладкие	гофрированные	из металлической	из метал-	из продольных про-				
трубчатые	трубчатые	фольги	лопластмас-	волок				
(классичес-			вой ленты					
кие)	спираль-	кольце-						
	но	образно	гладкие	гофри-	прямых	гофриро-		
			рован-	ванных		ванных		
x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	-	-	-	-	-	-

иерархические связи. Выше отмечалось, что принято также классифицировать радиочастотные кабели по гибкости, а фактически по конструктивному исполнению проводников. Поскольку в электрических параметрах миниатюрных и среднегабаритных кабелей конструкция проводников играет главную, а в крупногабаритных равноправную с изоляцией роль, этот признак должен быть отнесен к основным и учтен в классификационной системе. Из второстепенных признаков следует отметить конструкции оболочки и вариации в использовании материалов по отношению к основной конструктивной схеме.

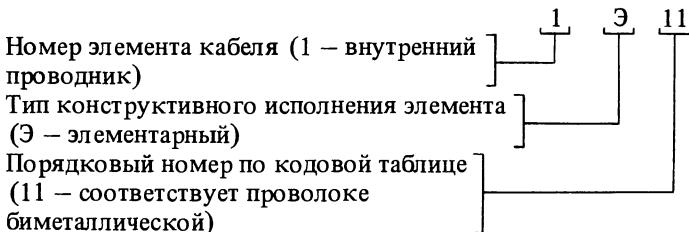
В каталогах и справочных изданиях прежде всего дается описание конструкции. Специалисты легко выделяют кабели, близкие по конструктивной схеме. Поэтому, не исключая классификаций по перечисленным признакам, считаем необходимым обратить особое внимание на классификацию по конструктивному исполнению кабелей в целом. Система классификации по конструктивной схеме не исключает систем классификации по другим признакам, например по волновому сопротивлению, теплостойкости, гибкости, экранным свойствам. При этом необходимо помнить, что одно и то же множество классифицируемых объектов (в нашем случае множество радиочастотных кабелей), в различных системах будет давать свое представление.

Идеальной была бы система, которая однозначным образом описывала нарастание модифицирующих изменений базового конструктивного типа, позволяла выявить аналогичные конструкции, отличающиеся только материалами. Однако перечень конструкций отдельных элементов и применяемых материалов так велик, что коды должны содержать не менее 16 разрядов. В то же время множество отечественных радиочастотных кабелей не превышает 300 маркоразмеров, описываемых примерно 130 конструктивными схемами. Весь мировой фонд конструктивных схем радиочастотных кабелей оценивается на уровне 250 решений.

Поэтому для построения системы классификации радиочастотных кабелей по конструктивной схеме предпочтительнее использовать метод серийно-порядкового кодирования согласно ГОСТ 17369-78, который позволяет в отличие от фасетного выявить ряд иерархических связей. Одновременно, учитывая небольшой размер классифицируемого множества, серийно-порядковый метод позволяет обойтись четырехзначным кодом.

Кодирование исполнений элементов кабеля. Под конструктивным исполнением элемента понимается форма и сочетание отдельных деталей следующих конструктивных элементов: внутреннего проводника, изоляции, внешнего проводника и оболочки. Указанные элементы характерны прежде всего для коаксиальных кабелей, но данная система кодирования элементов может применяться также для симметричных, спиральных и полосковых радиочастотных кабелей.

Для обозначения конструктивных элементов применен четырехзначный буквенно-цифровой код, принцип которого показан ниже:



Для обозначения конструктивных исполнений каждого элемента отводится по 200 знаков: из них 100 для наиболее простых (элементарных) и 100 для комбинированных (многоэлементных и многослойных) исполнений (табл. 1.2). В табл. 1.3 приведены примеры кодов наиболее употребительных исполнений конструктивных элементов.

Эта система кодирования предполагает, что для полного описания конструкции элемента необходимо указать: конструктивное исполнение, материал и размеры.

Таблица 1.2. Свободная таблица кодов элементов

Тип конструктивного исполнения	Внутренний проводник	Изоляция	Внешний проводник	Оболочка и защитные покровы
Элементарный	1ЭХХ	2ЭХХ	3ЭХХ	4ЭХХ
Комбинированный	1МХХ	2МХХ	3МХХ	4МХХ

Кодирование конструктивной схемы кабеля. Под конструктивной схемой кабеля понимается полное описание исполнений всех элементов

Таблица 1.3. Примеры кодов исполнений конструктивных элементов радиочастотных кабелей

Номер элемента кабеля	Исполнение	Код	Обозначение
1	Однопроволочный монометаллический Однопроволочный биметаллический Однопроволечный триметаллический Скрученный из семи монометаллических проволок Скрученный из семи биметаллических проволок	1Э01 1Э11 1Э12 1Э21 1Э23	ПРОВ ПРБИ ПРТР СКР7 СКРБ7
2	Сплошная монолитная Сплошная ленточная спиральная Полувоздушная пористая Полувоздушная кордально-ленточная	2Э01 2Э06 2Э02 2М11	МОН ПОР ОБМ ККОБ
3	Трубчатый сплошной гладкий Трубчатый сварной гофрированный спирально Плетеный из круглых монометаллических проволок (оплетка) Плетеный из круглых биметаллических проволок Ленточно-гофрированный с дренажной проволокой Двойной плетеный из круглых биметаллических проволок (двойная оплетка)	3Э01 3Э06 3Э22 3Э66 3М11 3М17	ТРУБ ТСГС ОПЛ ОПЛБ ПФГД ДВОБ
4	Без оболочки Монолитная гладкая Ленточно-оплеточно-пленочная (обмотка лентами, оплетка нитями, лакировка)	4Э01 4Э02 4М09	— МОН ООПЛ

и материалов, примененных в каждом элементе, но без указания размеров. Любая модификация исполнения хотя бы одного элемента или замена материала рассматривается как новая конструктивная схема.

Здесь также использован четырехзначный буквенно-цифровой код, а принцип кодирования показан ниже:

Коаксиальный – указание на структуру электромагнитного поля в кабеле

Порядковый номер серии

(1 – соответствует гибким кабелям со сплошной изоляцией из полиолефинов)

Порядковый номер конструктивной схемы внутри серии (06 – соответствует кабелю с внутренним проводником в виде медной луженой проволоки, сплошной изоляцией из полиэтилена, внешним проводником в виде оплетки из луженых проволок и монолитной оболочкой из поливинилхлорида)

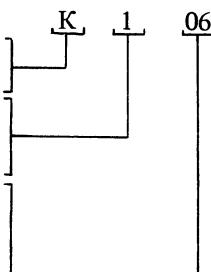


Таблица 1.4. Коды серий коаксиальных радиочастотных кабелей

Коды	Кабели, входящие в серию
K100–K199	Гибкие со сплошной изоляцией из полиэтилена и других полиолефинов
K200–K299	Гибкие со сплошной изоляцией из фторполимеров
K300–K399	Гибкие с полувоздушной и воздушной изоляцией из полиэтилена и других полиолефинов
K400–K499	Гибкие с полувоздушной и воздушной изоляцией из фторполимеров
K500–K599	Полужесткие с гладкими трубчатыми внешними проводниками. Все виды изоляции
K600–K699	Полужесткие с гофрированными трубчатыми внешними проводниками. Все виды изоляции
K700–K799	Кабели с продольно наложенным внешним проводником (полугибкие). Все виды изоляции

По такому же принципу могут быть составлены коды для кабелей других типов: симметричных, спиральных и полосковых. В соответствии с действующей системой маркообразования их коды рекомендуется начинать буквами Д, С и П соответственно.

Выше отмечалось, что из конструктивных признаков кабеля наибольшее значение имеют гибкость (конструкция проводников), сплошность изоляции, теплостойкость. В соответствии с этими признаками известные конструктивные схемы целесообразно объединить в семь серий (табл. 1.4). При составлении кодов конструктивных схем используются сокращения наименований материалов. Список принятых сокращений приведен в примечании к табл. 7.1.

Указанным способом составлены кодовые таблицы большинства конструктивных схем коаксиальных радиочастотных кабелей, используемых в мировой практике. Разработанные к настоящему времени таблицы включают 240 конструктивных схем ряда отечественных и зарубежных коаксиальных радиочастотных кабелей. Примеры описаний некоторых конструктивных схем показаны в табл. 1.5.

Анализ показал, что из 157 известных исполнений отдельных элементов широко используется только 31 и частота их использования сильно колеблется. В частности, из 27 возможных исполнений внутреннего проводника используется 18, а широко только 7; в изоляции из 43 используется 20 (широко 8). Для внешнего проводника известно 53 исполнения, а используется 17 (широко 9). Для сболочек и защитных покровов используется 18 исполнений из 34, но широко только 7. Элемент считается широко применяемым, если используется не менее чем в пяти конструктивных схемах.

Внутри каждой серии возможны по крайней мере еще четыре иерархических уровня: семейство, группа, конструктивная схема, конкретная конструкция кабеля. В рассмотренной системе принадлежность к семейству и группе не кодируется, но для поиска аналога и прототипа подмножества семейств и групп могут быть полезны.

Таблица 1.5. Примеры описаний конструктивных схем коаксиальных радиочастотных кабелей

Серия	Код конструктивной схемы	Исполнение элементов кабеля			
		Внутренний проводник	Изоляция	Внешний проводник	Оболочка, защитный покров
1	K100	1Э01 ПРОВ М	2Э01 МОН ПЭ	3Э01 ОПЛ М	4Э02 МОН СПЭ
	K121	1Э23 СКРБ7 БРС	2Э01 МОН ПЭ	3Э66 ОПЛБ МС	4Э02 МОН СПЭ
2	K200	1Э11 ПРБИ МС	2Э01 МОН Ф4Д	3Э66 ОПЛБ МС	4Э02 МОН Ф4МБ
	K204	1Э11 ПРБИ МС	2Э02 ОБМ Ф4	3Э66 ОПЛБ МС	4М09 ООПЛ Ф4, СН, КЛ
3	K302	1Э01 ПРОВ М	2Э06 ПОР ПЭП	3Э22 ОПЛ М	4Э02 МОН ПВХ
4	K404	1Э23 СКРБ7 МС	2М11 ККОБ Ф4Д, Ф4	3Э66 ОПЛБ МС	4Э02 МОН Ф4МБ
5	K500	1Э12 ПРТР СМС	2Э01 МОН Ф4Д	3Э01 ТРУБ М	4Э01 — —
6	K600	1Э01 ПРОВ М	2Э01 МОН ПЭ	3Э06 ТСГС М	4Э02 МОН СПЭ
7	K700	1Э01 ПРОВ М	2Э01 МОН ПЭ	3М11 ПФГД М, М	4Э02 МОН СПЭ

Так, все множество известных кабелей со сплошной изоляцией из полиэтилена, входящих в первую серию, может быть разделено на семь семейств в соответствии с табл. 1.1: кабели с внешними проводниками в виде одной, двух или трех оплеток, с внешними проводниками в виде повива плоских или круглых проволок, кабели триаксиальной схемы.

В свою очередь, каждое семейство делится на группы близких конструктивных схем. Например, семейство кабелей с внешним проводником в виде одной оплетки может быть разделено на группы по признаку конструктивного исполнения внутреннего проводника или оболочки.

Для кабелей, входящих в каждую группу, полезно выделить базовую и модифицированные конструктивные схемы.

Базовая конструктивная схема – основной вариант конструктивной схемы кабелей, входящих в данную группу, являющийся базой для разработки модификаций.

Модифицированная конструктивная схема – описание конструктивной схемы кабеля, производной от базовой и предназначено для оптимального решения частных задач.

Проиллюстрируем эти понятия на примере группы, включающей радиочастотные коаксиальные кабели с однопроволочным внутренним проводником, сплошной изоляцией из полиэтилена и внешним проводником в виде оплетки из медных проволок. В этой группе в качестве базовой принята конструктивная схема, у которой внутренний проводник из медной проволоки, а монолитная оболочка из светостабилизированного полиэтилена (для коаксиальных кабелей код К100).

Модификациями базовой считаются схемы:
с оболочкой из поливинилхлорида (К101), что повышает гибкость;
без оболочки (К102) для применений в защищенной аппаратуре, где важны малые габариты;
с усиленным биметаллическим (сталь–медь) внутренним проводником (К107).

Далее следуют схемы, которые, по существу, являются двойными модификациями: с внутренним биметаллическим проводником и оболочкой из ПВХ (К112) или полиамида (К113). И, наконец, схема с усиленным бронзовым внутренним проводником и оболочкой из ПВХ (К110).

Как видно из приведенного примера, объединение отдельных конструктивных схем в семейства и группы не является однозначным. Тот же массив схем может классифицироваться и по другим признакам, например по волновому сопротивлению, по диапазону рабочих температур, который у кабелей с оболочкой из полиэтилена $-60\div+85^{\circ}\text{C}$, а у кабелей с оболочкой из поливинилхлорида $-40\div+70^{\circ}\text{C}$. Признак классификации определяется задачей, стоящей перед конструктором.

Серийно-порядковый метод кодирования конструктивных схем использован при составлении справочных таблиц радиочастотных кабелей, приведенных в приложении.

1.5. СИСТЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ И ДОКУМЕНТАЦИИ НА РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

Радиочастотные кабели относятся к изделиям, в разработке, производстве и использовании которых традиционно большую роль играют международные и национальные стандарты. Уже в пятидесятых годах МЭК начала работы по созданию стандартов на радиочастотные кабели. В настоящее время существует несколько публикаций МЭК, в которых изложены общие требования к кабелям и методы испытаний; размерно-

параметрические ряды; частные спецификации на наиболее массовые конструкции.

Основой стандартов МЭК по радиочастотным кабелям является *Публикация 96-1. Общие требования и методы испытаний*. Последнее, третье издание этой публикации принято в 1971 г. Позднее, в 1976 г., издано небольшое дополнение 96-1А, в котором описана методика измерения коэффициента стоячей волны. Поправка № 1 к Публикации 96-1, принятая в 1984 г., предусматривает еще один дополнительный метод определения сопротивления связи (эффективности экранирования) в диапазоне частот до 1000 МГц.

Сама Публикация 96-1 в первом разделе содержит определения терминов, описывающих конструкцию и электрические параметры, а также определения, касающиеся процесса испытаний. Приводятся требования к основным конструктивным элементам кабеля. Наиболее подробно изложены требования к внутреннему и внешнему проводникам.

Раздел второй перечисляет виды и содержит методики электрических испытаний таких параметров, как: сопротивление проводников и изоляции; электрическая прочность изоляции и оболочки; напряжение начала короны; емкость и емкостная асимметрия; относительная скорость распространения; волновое сопротивление и его неравномерность; коэффициент затухания; эффективность экранирования.

Разделы третий и четвертый перечисляют виды и содержат методики химических, климатических и механических испытаний, при которых критериальными параметрами выбраны такие, как: стабильность емкости, стабильность затухания, тепловая стабильность, стабильность размеров.

Раздел пятый содержит правила маркообразования и маркировки кабелей.

В приложении приводятся дополнительные методы измерений волнового сопротивления, его неравномерности и неоднородности по длине, коэффициента затухания, эффективности экранирования и напряжения начала короны.

В подкомитете 46А "Радиочастотные кабели" продолжается разработка усовершенствованной методики измерения отражения в кабелях.

Один из наиболее ранних стандартов МЭК по радиочастотным кабелям – Публикация 78, третье издание которой принято в 1967 г., устанавливает стандартные ряды двух основных присоединительных параметров, определяющих канал распространения волн: диаметров по изоляции и волновых сопротивлений.

Публикация 96-0, первое издание которой действует с 1970 г., называется: "Часть 0. Руководство для составления частных спецификаций". В ней содержатся разделы: I. Термины, комментарии, символы и значения. II. Сведения для составления и расчета спецификаций кабелей. III. Справочные данные и приложение. Документ обобщил опыт рас-

чета основных параметров кабелей на момент принятия, содержит рекомендации по широко используемым константам.

Проводится работа по пересмотру Публикаций 78 и 96-0 и объединению их в одном стандарте.

Проект стандарта содержит более подробные и точные рекомендации по расчету параметров радиочастотных коаксиальных кабелей, чем действующая Публикация 96-0.

В частности, рабочую температуру 85°C рекомендуется устанавливать только для полизтилена высокой плотности. Для остальных сортов полизтилена рекомендована максимальная рабочая температура 80°C . Приводится таблица, позволяющая определить коэффициент защитного покрытия для биметаллических проводников. Значения совпадают с данными, приведенными в гл. 3. Значение коэффициента скрутки K_{10} , учитываемого при расчете затухания, дается равным 1,25; но частотная зависимость не приводится. Значение коэффициента оплетки $K_{3a} = 2,0$ показано как приблизительное. Рекомендации гл. 3 значительно полнее. В остальном подход к расчету параметров близок к принятому в данной книге.

Серия публикаций 96-2 называется "Часть 2. Частные спецификации на кабели". Первое издание этой публикации (1961 г.) содержит описание восемнадцати конструкций коаксиальных кабелей со сплошной полизтиленовой изоляцией, волновым сопротивлением 50 и 75 Ом и диаметрами по изоляции 1,5–17,3 мм.

Первое дополнение (Публикация 96-2А, 1965 г.) содержит описание еще 12 конструкций. Из них шесть конструкций с двумя оплетками, две конструкции с изоляцией из пористого полизтилена и две конструкции симметричных неэкранированных кабелей для телевизионных спусков.

Второе дополнение (Публикация 96-2В, 1966 г.) вводит только одну конструкцию коаксиального гибкого кабеля с кордально-тубчатой полизтиленовой полу воздушной изоляцией и волновым сопротивлением 100 Ом.

Третье дополнение (Публикация 96-2С, 1976 г.) впервые вводит кабели с политетрафторэтиленовой изоляцией, в том числе 12 конструкций 50-омных кабелей с диаметрами по изоляции: 0,87; 1,5; 2,95; 7,25; 11,5 мм и семь конструкций 75-омных с диаметрами: 1,5; 3,7; 7,25 мм.

Всего документами МЭК стандартизировано 50 гибких конструкций радиочастотных кабелей.

В 1982 г. принятая Публикация 96-3 (первое издание) "Основные требования и испытания однокоаксиальных кабелей, используемых в кабельных распределительных системах". Данная публикация опирается на требования Публикаций 96-0, 96-1 и содержит специфические требования к кабелям, используемым для распределения телевизионных сигналов. Установлены требования по коэффициенту затухания, допускам на волновое сопротивление, входному коэффициенту отражения.

Кроме того, подкомитет 46А ведет разработку общих требований и методов испытаний кабельных коаксиальных кабелей, армированных соединителями, поставляемых и используемых как одно целое.

Другая рабочая группа подкомитета 46А ведет разработку общих требований, методов испытаний и частных спецификаций на кабели с усиленной экранировкой. Последняя обеспечивается за счет наложения поверх внешнего проводника стальных лент с высокой магнитной проницаемостью.

Система стандартизации радиочастотных кабелей в СССР тесно увязана с системой, принятой МЭК. Она включает два основных раздела: "Кабели радиочастотные. Общие технические условия" (ГОСТ 11326.0-78) и частные технические условия на 123 маркоразмера коаксиальных и симметричных кабелей (ГОСТ 11326.1-79 – ГОСТ 11326.92-79). Частные ГОСТ включают кабели со сплошной и полу воздушной полимертиленовой изоляцией и сплошной фторопластовой. Размеры полимертиленовой изоляции от 1 до 44 мм, фторопластовой – от 1 до 11,5 мм.

Указанная система ГОСТ является базой еще для примерно 200 независимых частных технических условий на радиочастотные кабели.

Опыт стандартизации, накопленный в СССР, послужил основой для стандарта СЭВ № 1100-78 "Кабели радиочастотные. Общие технические условия", введенного в действие с 1980 г.

Радиочастотные кабели, как и другие кабельные изделия, относятся к комплектующим, т.е. они используются не самостоятельно, а в соединении с другими изделиями – с блоками высокочастотной радиоаппаратуры. Эта особенность комплектующих изделий приводит к необходимости стандартизации присоединительного параметра. Указанный параметр – важнейший показатель комплектующего изделия, показывающий возможность "стыковки" с аппаратурой, в которой будет эксплуатироваться кабель. В понятие присоединительный параметр входят: волновое сопротивление, диаметр по изоляции, а для много-кабельных конструкций – общее число коаксиалов, симметричных цепей и т.п.

Если волновое сопротивление кабеля совпадает с волновым сопротивлением радиочастотного тракта, то обеспечивается однородность тракта в целом. Для радиочастотных кабелей, как и для каналов распространения в радиотехнических изделиях, установлен стандартный ряд волновых сопротивлений, основаниями которого являются 50 и 75 Ом. Остальные значения образуются умножением и делением этих двух.

Согласно ГОСТ 11326.0-78 и сложившейся практике применяются следующие ряды номинальных волновых сопротивлений (табл. 1.6).

Диаметр по изоляции определяет ряд параметров кабеля и прежде всего такие важные, как коэффициент затухания и номинальная мощность. С диаметром по изоляции связаны размеры, масса, гибкость и другие механические параметры. Стандартизация этого размера позволя-

Таблица 1.6. Волновые сопротивления радиочастотных кабелей

Подвид радиочастотного кабеля	Стандартные значения волнового сопротивления, Ом
Коаксиальный	6; 9,5; 12,5; 19; 25; 37,5; 50; 75; 100; 150; 200
Спиральный	50; 75; 100; 150; 200; 400; 800; 1600; 3200
Полосковый	3; 4; 6; 9; 10; 12; 18; 30
Симметричный	50; 75; 100; 150; 200; 300
П р и м е ч а н и е .	Выделены фактически используемые значения.

Таблица 1.7. Основные размеры радиочастотных кабелей

Подвид радиочастотного кабеля	Нормируемый размер	Стандартные значения, мм
Коаксиальный	Диаметр по изоляции	0,15; 0,3; 0,6; 0,87; 1,0; 1,5; 2,2; 2,95; 3,7; 4,6; 5,6; 7,25; 9,0; 11,5; 13; 17,3; 24; 33; 44; 60; 75; 120
Спиральный	Диаметр сердечника	3, 7
Полосковый	Ширина плоского проводника	3, 5, 7
Симметричный	Наибольший размер по изоляции; по заполнению или скрутке; диаметр по изоляции коаксиала	0,6; 0,87; 1,0; 1,5; 2,2; 2,95; 3,7; 4,6; 5,6; 7,25; 9,0; 11,5; 13,0; 17,3; 24,0; 33,0; 44,0; 60; 75
П р и м е ч а н и е .	Выделены фактически используемые размеры.	

ет унифицировать высокочастотные соединители и технологические процессы изготовления кабелей.

Стандартизованные ряды номинальных диаметров по изоляции и аналогичных им геометрических размеров, приведены в табл. 1.7.

Помимо диаметра по изоляции стандартизована минимальная толщина оболочки. Однако отсутствие стандартов на наружные размеры привело к многообразию даже однотипных внешних проводников и оболочек. Это вызывает перерасход материалов и усложняет унификацию соединителей. Видимо, назрела необходимость унификации конструкций внешних проводников и введение стандартного ряда наружных диаметров кабелей. Подобная унификация, проведенная в отношении миниатюрных коаксиальных кабелей, дала значительный экономический эффект [18].

В капиталистических странах наибольшую известность получила система стандартов MIL-C-17 (США), также состоящая из двух разделов:

I. Общие требования и методы испытаний (последняя редакция имеет обозначение MIL-C-17-F).

II. Частные спецификации на отдельные маркоразмеры кабелей. Все известные зарубежные фирмы-производители радиочастотных кабелей поставляют кабели по требованиям MIL-C-17.

1.6. СИСТЕМЫ МАРКООБРАЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Система маркообразования отечественных радиочастотных кабелей, предусмотренная ГОСТ 11326.0-78, построена так, что в марке кабеля буквами указываются назначение и структура электромагнитного поля, а цифрами номинальное значение волнового сопротивления в омах, округленное значение диаметра по изоляции в миллиметрах, условное обозначение конструктивного исполнения изоляции и порядковый номер разработки.

Первая буква обозначает вид кабеля (Р – радиочастотный), вторая – структуру электромагнитного поля в кабеле, определяемую конфигурацией проводников (подвид) :

РК – радиочастотный коаксиальный;

РД – радиочастотный симметричный (двухпроводный) ;

РС – радиочастотный спиральный;

РП – радиочастотный полосковый.

Например, РК 50-2-25 означает:

РК – радиочастотный коаксиальный;

50 – волновое сопротивление, Ом;

2 – диаметр по изоляции (2,2 мм) ;

2 – сплошная фторопластовая изоляция;

5 – порядковый номер разработки кабелей РК 50-2-2 . . .

Наличие первых двух чисел в марке является большим достоинством системы, так как в них содержится важная иноформация об электрическом и геометрическом присоединительных размерах кабеля. К тому же это соответствует принципу, установленному Публикацией МЭК 96-1.

Третье число довольно точно указывает теплостойкость и конструктивное исполнение изоляции, но не может однозначно описать все известные конструктивные решения. Так, и пористая, и кордально-трубчатая изоляция обозначаются одинаковыми числами (3 или 4).

Система не предусматривает условных обозначений для других элементов кабеля и для конструктивной схемы кабеля в целом, которая и определяет его параметры. Отчасти эту роль выполняет число, указывающее порядковый номер разработки. Но, поскольку кабели одинаковой конструктивной схемы, различающиеся присоединительными размерами, разрабатывались, как правило, в разное время, порядковый номер разработки у них не совпадает.

Например: РК 50-2-15 и РК 50-4-11.

Оба кабеля гибкой конструкции с однопроволочным медным внутренним проводником, сплошной полиэтиленовой изоляцией, внеш-

ним проводником в виде двойной оплетки из медных проволок и оболочкой из светостабилизированного полиэтилена. Таким образом, определить одинаковость конструктивных схем указанных кабелей по маркировке невозможно.

Существующая система маркообразования возникла в период, когда были распространены радиочастотные кабели только гибкой конструкции с внешним проводником в виде оплетки. В настоящее время значительно увеличилось количество конструктивных исполнений внешних проводников. Получили распространение полужесткие, полугибкие и комбинированные конструкции внешних проводников, заметно возросло общее количество маркоразмеров. В этих условиях старая система вызывает затруднения даже у разработчиков кабелей.

Для кабелей, стандартизованных МЭК, установлены следующие правила маркообразования:

сначала указывается номер стандарта: 96МЭК (96 IEC);
затем волновое сопротивление;
округленно диаметр по изоляции;
порядковый номер конструкции при данных присоединительных параметрах.

Например: 96 МЭК 50-2-1; 96 МЭК 50-3-1; 96 МЭК 75-5-1.

В указанном примере конструктивные схемы всех трех марок различны, но в маркировке это не нашло отражения, следовательно, эта система страдает тем же недостатком, что и принятая в ГОСТ 11326.0-78.

В последней редакции MIL-C-17 принятые модифицированные по отношению к ранее применявшейся системе правила маркообразования, а именно:

индекс стандарта M17;
трехзначный порядковый номер технических условий;
обозначение марки для ранее разработанных конструкций или порядковый номер исполнения по данным техническим условиям (для новых конструкций).

Например: M17/113 – RG 316; M17/152 – 00001.

Данная система чисто порядковая – в марке отсутствуют конструктивные признаки. Очень полезна последняя добавка, которая служит для обозначения небольших модификаций основного исполнения.

ГЛАВА 2

ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ И ПРОЦЕДУРЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

2.1. ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ И ТИПОВОЙ ЦИКЛ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО КАБЕЛЯ

Конструирование можно рассматривать как часть более общего процесса разработки и постановки изделия на производство. Разработка радиочастотного кабеля, как и других изделий техники, согласно ГОСТ 15.001-88 состоит из стандартных этапов.

Первым официальным этапом разработки, т.е. проведения опытно-конструкторской работы (ОКР), является разработка технического задания (ТЗ). Но фактически разработка начинается раньше путем проведения одной или нескольких научно-исследовательских работ (НИР), в ходе которых создаются научные и технические предпосылки разработки нового кабеля. При проведении НИР по новым конструктивным решениям обязательно выполняется расчет параметров нескольких предполагаемых кабелей и сравнение результатов с параметрами существующих аналогов.

При разработке ТЗ на ОКР используются данные ранее проведенных исследований, патентных решений, учитываются тенденции развития данного вида кабелей и требования типажей.

Основной этап ОКР связан с разработкой технической документации (ТД), изготовлением и испытаниями опытной партии. Обычно он разделяется на три стадии, определяемые ГОСТ 2.103-68 и связанные с разработкой эскизного проекта, технического проекта и рабочей документации.

На всех стадиях в большей или меньшей степени требуется выполнять конструкторские процедуры. Работа эта носит циклический характер. Каждый последующий цикл позволяет уточнить решения и значения параметров, определенные на предыдущем этапе. Однако стадией разработки конструкторские процедуры не заканчиваются. В процессе выпуска установочной серии и серийного производства может потребоваться доработка конструкции кабеля и корректировка документации, связанная с вновь обнаруженными явлениями, вводом нового технологического оборудования, с появлением новых материалов или с необходимостью повысить уровень качества серийной продукции.

Разработка конструкции радиочастотного кабеля, как и любого другого изделия, проходит несколько циклов последовательного уточнения конструктивной схемы, технологии, документации. Таких циклов, как правило, пять. Они заканчиваются соответственно на стадиях эскизного, технического, рабочего проектов, выпуска установочной серии и серийного производства.

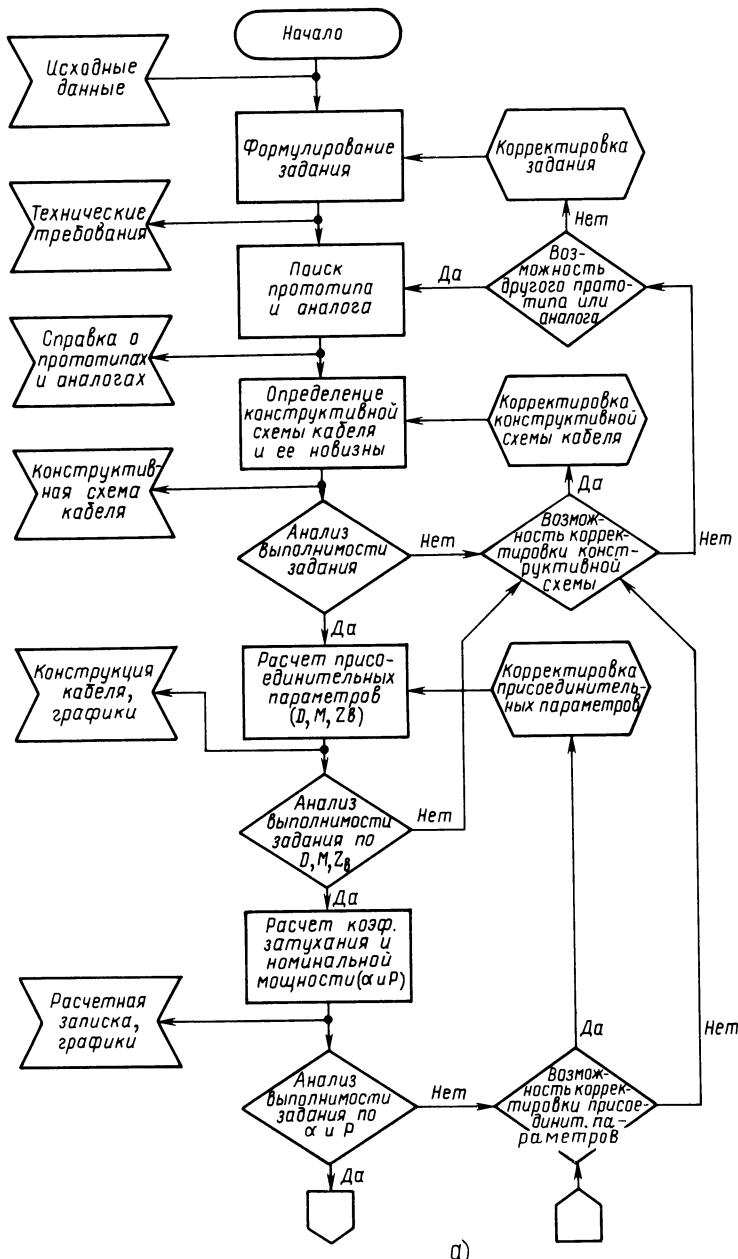
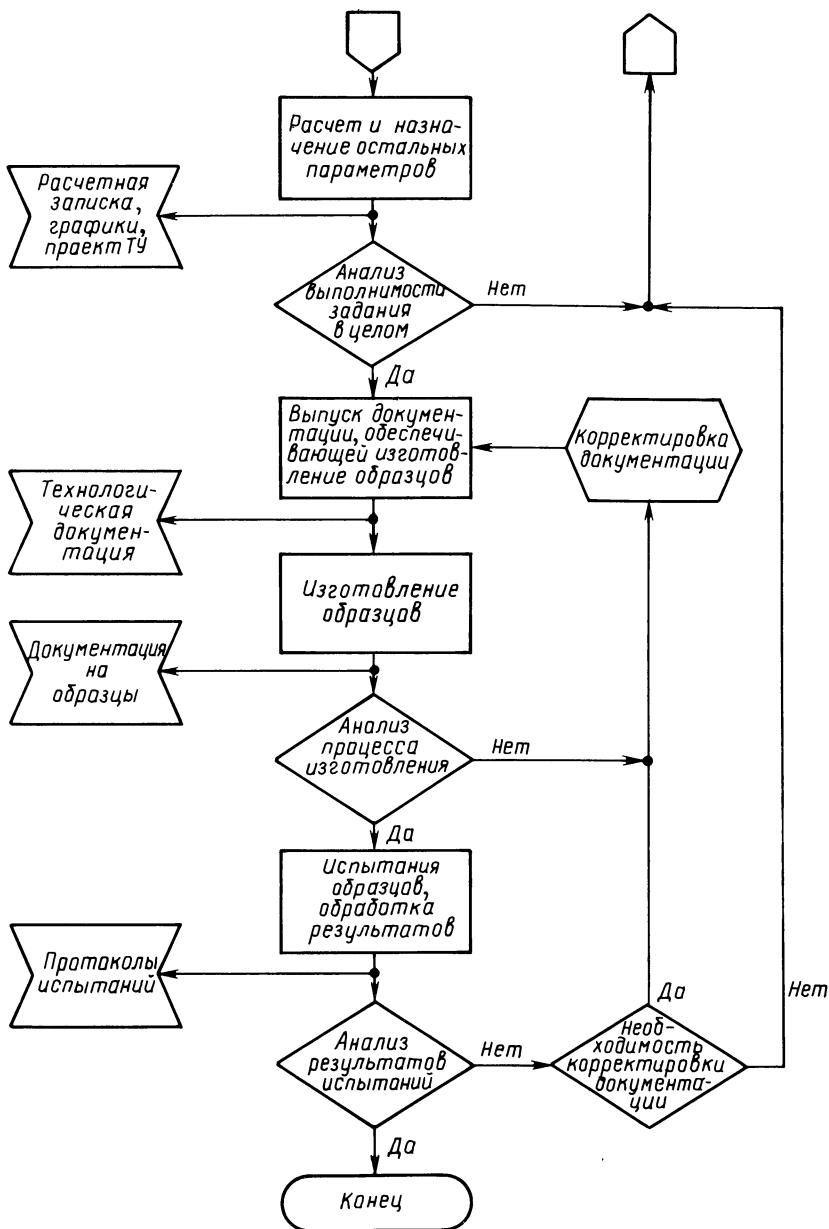


Рис. 2.1. Типовой цикл конструи

a – начало;



б)

рования радиочастотного кабеля:
б – конец

Схема типового цикла конструирования показана на рис. 2.1. Под типовым циклом конструирования мы понимаем все процедуры от формирования задания (появления замысла) до анализа результатов испытаний образцов. По результатам испытаний обычно производится корректировка замысла разработки. Процедуры конструирования, которые мы будем рассматривать, характерны для ОКР. При проведении НИР по новым конструкциям сохраняются в основном эти же процедуры, но самое главное, что и здесь могут быть выделены циклы, начинающиеся замыслом и кончающиеся анализом полученных результатов. Процесс проектирования радиочастотного кабеля носит итерационный характер. Первый пробный результат, получаемый после определения конструктивной схемы, затем уточняется по результатам расчета присоединительных параметров, коэффициента затухания, номинальной мощности и других электрических, механических и климатических параметров. Следует отметить, что часть из них, такие, как минимальная и максимальная рабочая температура, устойчивость к изгибам и разнообразным воздействиям, первоначально назначается по аналогии с имеющимися кабелями. Это связано с отсутствием методик расчета. Окончательные значения таких параметров устанавливаются по результатам испытаний образцов.

В левой части схемы цикла конструирования показаны основные сопутствующие документы. При оформлении документации до половины времени уходит на внесение корректировок. Поэтому так важно унифицировать применяемые документы и автоматизировать процесс их разработки и корректировки с помощью САПР [19].

2.2 ПАРАМЕТРЫ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Радиочастотные кабели подобно другим кабельным изделиям характеризуются параметрами, которые с учетом их особенностей и существующих между ними связей могут быть разделены на следующие группы: параметры стандартизации, конструктивные, технологические, электрические, механические, климатические, параметры надежности и качества, экономические.

Предложенную классификацию параметров следует рассматривать как развитие системы, принятой в действующей документации. В общих технических условиях на радиочастотные кабели термин "параметр" применяется только по отношению к электрическим характеристикам. В целях унификации и использования в автоматизированных информационных системах мы расширили применение указанного термина.

В группу параметров *стандартизации* включаются: марка кабеля, номер технических условий, дата разработки и последнего пересмотра ТУ, фамилии авторов разработки и модернизации кабелей. Здесь же могут даваться ссылки на ГОСТ и ТУ, которым подчиняются ТУ на кабель, а также обозначения конструкторских и технологических документов.

Конструктивные параметры — это описания формы, материалов и количества составных элементов, размеров и массы как отдельных элементов, так и кабеля в целом.

Технологические параметры — это последовательность и режимы изготовления кабеля с привязкой технологического оборудования, инструмента и вспомогательных материалов.

К *электрическим* относятся первичные и вторичные параметры передачи, параметры экранирования и допустимая мощность. К ним также относятся и уходы (стабильности) электрических параметров при различных воздействиях и от времени.

Механическими называются параметры, характеризующие устойчивость кабеля к разнообразным механическим воздействиям, таким, как вибрации, удары, линейные нагрузки, перегибы, перемотки. Раздел механических параметров в действующей документации называется "Стойкость при механических воздействиях". Однако этот раздел не охватывает всех механических характеристик кабеля. Так, радиусы изгиба отнесены к конструктивным параметрам, стойкость к пониженному и повышенному давлению и динамическому воздействию пыли — к климатическим параметрам. Учитывая возрастающую роль и многочисленность механических параметров, авторы считают целесообразным изменить их группировку.

Климатическими называют параметры, характеризующие устойчивость кабеля к неэлектрическим и немеханическим воздействиям внешней среды, связанным в значительной степени с понятием "климат". Сюда относятся устойчивость к воздействию пониженной и повышенной температуры, влажности и иея, солнечного излучения, агрессивных сред.

Параметры *надежности и качества* характеризуют срок безотказной работы в рабочих условиях, 95%-ный ресурс, общий срок службы, включающий срок хранения, а также категорию качества изделия.

Экономические параметры не рассматриваются в технической документации типа ТУ, однако их значение не меньше технических параметров.

Они включают оптовую и лимитную цены на кабель, надбавки за качество и новизну, себестоимость изготовления, экономический эффект от внедрения и в значительной мере определяют конструктивные и технологические решения.

Для радиочастотных кабелей, как для электротехнических изделий, наиболее важны электрические параметры. Их можно разделить на две группы. К первой группе следует отнести параметры, определяемые для произвольного поперечного сечения кабеля или отнесенные к единице его длины, а ко второй — параметры, определяемые только для заданного отрезка кабеля в целом.

К первой группе относятся все основные первичные и вторичные электрические параметры: сопротивление проводников и изоляции, электрическая емкость и индуктивность кабеля, волновое сопротивление, коэффициенты фазы и затухания, температурные коэффициенты затухания (ТКЗ), фазы (ТКФ), емкости (ТКЕ) и др.

К второй группе относятся коэффициент отражения кабеля, коэффициент стоячей волны (КСВ), неравномерность частотных характеристик затухания и фазы, т.е. те параметры, в формировании которых участвует одновременно весь рассматриваемый отрезок кабеля.

Охарактеризуем параметры первой группы.

1. Волновое сопротивление – представляет собой отношение напряжения к току в кабеле для падающей или отраженной волны. Обозначается Z_B , единица измерения – Ом.

2. Коэффициент затухания – характеризует степень ослабления волны, распространяющейся вдоль кабеля, на единице его длины. Обозначается α , единица измерения – дБ/м.

3. Допустимая мощность – представляет собой величину мощности, которую можно передавать по кабелю (при которой не происходит нагрева кабеля выше допустимой температуры или пробоя изоляции). Обозначается P , единица измерения – Вт, кВт. (Существуют понятия номинальной и допустимой средней мощности, импульсной мощности, кратковременно допустимой и др.)

4. Коэффициент фазы – характеризует изменение фазы распространяющейся волны на единице длины кабеля. Обозначается β , единица измерения – рад/м, град/м.

Обычно определяющим параметром является не β , а температурный коэффициент фазы, который представляет собой изменение коэффициента фазы кабеля при изменении температуры. Обозначается ТКФ, единица измерения – $1/10^6 \cdot$ град.

5. Коэффициент замедления (или укорочения) волн – характеризует снижение скорости распространения волны (или уменьшение длины волны) в кабеле по сравнению со свободным пространством. Обозначение ξ , безразмерный.

6. Электрическое сопротивление проводников, отнесенное к единице длины кабеля. Обозначение R , единица измерения – Ом/м.

7. Электрическое сопротивление изоляции на постоянном токе, отнесенное к единице длины кабеля. Обозначается $R_{из}$, единица измерения – МОм·м.

8. Электрическая емкость единицы длины кабеля. Обозначается C , единица измерения – пФ/м.

9. Индуктивность единицы длины кабеля. Обозначается L , единица измерения – мГн/м.

10. Сопротивление связи – отношение напряжения, наведенного на единице длины кабеля током помех, текущим по внешней поверхности внешнего проводника, к величине этого тока. Если кабель является ис-

точником помех, то в качестве тока помехи выступает ток в кабеле, а напряжение рассматривается на внешней поверхности внешнего проводника. Обозначается Z_c , единица измерения – Ом/м.

Параметры, относящиеся ко второй группе, обычно оцениваются уже после выбора конструктивного исполнения и расчета основных размеров кабеля.

2.3. ПРОЦЕДУРЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО КАБЕЛЯ

Формулирование задания. Начальная часть цикла конструирования, ответственная в основном за идею конструкции, не формализована и не рассматривалась в литературе. Рассмотрим деятельность конструктора на начальной стадии разработки. Это поможет в выработке оптимальной стратегии конструирования. С другой стороны, формализация процедур конструирования необходима для автоматизации этого процесса.

Необходимость в разработке радиочастотного кабеля появляется в следующих случаях:

- по заявке потребителей кабелей;
- по инициативе разработчиков или изготовителей кабелей.

Сама разработка по объему, содержанию и уровню может быть отнесена к одному из четырех типов:

- 1) создание принципиально новой конструкции на основе новой конструктивной схемы;
- 2) создание новой конструкции на основе существующей конструктивной схемы;
- 3) модернизация существующей конструкции без изменения присоединительных размеров;
- 4) введение новых требований в документацию без изменения конструкции кабеля.

Независимо от причин, вызывающих разработку, требуется сформулировать технические требования на кабель. При подаче заявки на разработку, технические требования оформляются в обязательном порядке. В остальных случаях могут отсутствовать оформленные технические требования, но, обдумывая новую конструкцию, специалист так или иначе формулирует набор требований к ней.

Помимо формулирования перечня требований производится ранжирование требований по значимости. Это ранжирование определяет наименование и величину главных и второстепенных ограничений, которые напрямую связаны с конструкцией кабеля. В табл. 2.1 показана взаимосвязь основных параметров радиочастотного кабеля с его конструкцией. Таблица может быть полезной при ранжировании требований на всех стадиях разработки.

Таблица 2.1. Взаимосвязь параметров с конструкцией радиочастотного кабеля

Параметр	Особенность конструкции, связанная с параметром
Волновое сопротивление Z_B	Соотношение диаметров проводников D/d , эквивалентная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{ЭК}}$
Допуск на отклонение волнового сопротивления ΔZ_B	Точность изготовления элементов кабеля, стабильность технологических процессов
Коэффициент затухания a ; номинальная мощность P_H	Диаметр по изоляции $d_{\text{из}} (D)$, конструктивная схема кабеля, свойства примененных материалов, режим эксплуатации
Коэффициент фазы β ; температурный коэффициент фазы ТКФ	Конструктивная схема кабеля, особенно исполнение изоляции. Температурный режим эксплуатации
Сопротивление связи Z_C (затухание экранирования a_3)	Конструктивные исполнения внешнего проводника (экрана) и оболочки
Диапазон передаваемых частот $f_{\min} - f_{\max}$; критическая частота $f_{\text{кр}}$	Шаг наложения элементов периодической структуры. Половина длины периметра проводников $\pi(D + d)/2$, $\epsilon_{\text{ЭК}}$
Гибкость	Конструктивная схема кабеля
Диапазон рабочих температур (T_{\min}, T_{\max}) ; срок службы, наработка	Материал изоляции и оболочки; конструктивная схема кабеля

Следует признать желательным выработку формы для требований на новый кабель. Для единобразия документации и более полного задания исходных требований в качестве такой формы может быть использована унифицированная форма ТУ на радиочастотные кабели.

Задание на разработку должно быть проанализировано, чтобы определить, требуется ли вообще разработка, и, если требуется, к какому из перечисленных выше типов она должна быть отнесена.

Необходимость и тип разработки могут быть определены путем составления параметрической модели кабеля, требуемого по заданию, и ее сравнения с моделями существующих кабелей. Параметрическая модель радиочастотного кабеля обычно имеет вид двумерной матрицы, включающей наименования и значения конкретных параметров.

Соображения по выбору аналога и прототипа. Если ни один из существующих кабелей не удовлетворяет выдвинутым техническим требованиям (ТТ), хотя бы по одному основному параметру, требуется произвести разработку нового кабеля или модернизацию существующего. Первый этап разработки – это поиск аналогов и выбор прототипа.

Аналог – кабель, конструктивное исполнение которого обеспечивает (по первоначальной оценке) выполнение поставленной задачи или может служить основой для разработки конструктивной схемы нового кабеля.

Прототип – один из аналогов, наиболее полно решающий поставленную задачу. Определения аналога и прототипа даны в соответствии с определениями, принятыми в патентоведении [20].

Прототип или аналог всегда могут быть найдены, так как в любом новом решении есть один или несколько известных элементов или используется известная конструктивная схема. Поиск аналога – одна из наиболее интересных эвристических задач, достаточно трудно поддающихся формализации. Специалист, выбирая аналоги, учитывает очень большое число связей, в том числе неожиданных. Ряд связей устанавливается в ходе самого поиска. Но при этом человек оперирует с ограниченным числом параметров. Значительную помощь могут оказать автоматизированные информационно-поисковые системы, оперирующие с большим числом параметров.

Задание конструктивной схемы кабеля. При поиске аналогов и прототипа рекомендуется следующая последовательность действий.

1. На основе указанных в ТТ параметров и условий эксплуатации определить, к какой из перечисленных выше серий должен быть отнесен разрабатываемый кабель.

2. Определить, используя информационно-поисковые системы и системы классификации, кабели какого семейства и какой группы наиболее полно удовлетворяют ТТ.

3. В пределах выбранной группы аналогов найти базовую конструктивную схему и ту из модифицированных, которая ближе других к требованиям ТТ. Ее мы и будем считать прототипом. Может иметь место случай, когда по одним параметрам найдены аналоги в одной группе, а по другим – в другой группе, другом семействе или даже другой серии. Последнее означает, что для реализации ТТ потребуется разработка новой конструктивной схемы.

4. Предварительная оценка выполнимости ТТ осуществляется путем сопоставления параметров, указанных в требованиях, с параметрической моделью выбранного прототипа. Такое сопоставление показывает, по каким параметрам прототип не решает поставленной задачи, а также пути модификации. Существо модификации могут подсказать соображения, приведенные в табл. 2.1. Как правило, решение о пригодности принимают после разработки конструкции и первого цикла расчета основных параметров: габаритов, волнового сопротивления, коэффициента затухания и номинальной мощности на входе. Чтобы рассчитать указанные параметры кабелей, необходимо задать или рассчитать конструкцию кабеля, т.е. в дополнение к конструктивной схеме указать размеры всех элементов и слоев.

Расчет конструкции и параметров кабеля рекомендуется выполнять с учетом рекомендаций, изложенных ниже.

Составить описание конструктивной схемы разрабатываемого кабеля. Она должна представлять собой сумму описаний основных элементов кабеля: внутреннего проводника, изоляции, внешнего проводника (эк-

рана) и оболочки (защитного покрова). Описание каждого элемента составляется из закодированных описаний формы и примененных материалов. В случае многослойного или комбинированного исполнения следует указать материалы для всех слоев.

Полученная конструктивная схема может повторять уже известные, быть модификацией одной из базовых схем или представлять новое техническое решение. Проверка на новизну осуществляется сопоставлением с известными конструктивными схемами (гл. 7).

Задать значения присоединительных параметров, а именно номинального волнового сопротивления и диаметра по изоляции. Номинальное волновое сопротивление, как правило, задается в ТТ исходя из требований к устройству, в котором будет использоваться кабель. В случаях, когда номинальное волновое сопротивление не задано, рекомендуется выбирать его равным 50 Ом. Диаметр по изоляции определяет соответствие кабеля требованиям ТТ по таким параметрам, как коэффициент затухания и номинальная мощность на входе. Если найденный прототип соответствует по этим параметрам требованиям ТТ, то для дальнейших расчетов принимается габарит прототипа. Если не соответствует, то для определения диаметра по изоляции могут использоваться близкие и дальние аналоги.

Диаметр по изоляции может также задаваться косвенно через такие параметры, как наружный диаметр, минимальный радиус изгиба, критическая частота, масса.

Наружный диаметр и диаметр по изоляции достаточно тесно связаны соотношениями:

для гибких кабелей в оплётке и полужестких кабелей с гофрированными внешними проводниками

$$d_{из} = (0,5 \div 0,7)d_{нар}, \quad (2.1)$$

для полужестких кабелей с гладкими внешними проводниками и без оболочек

$$d_{из} = (0,65 \div 0,85)d_{нар}. \quad (2.2)$$

Минимально допустимый радиус изгиба кабеля связан с наружным диаметром и условиями эксплуатации соотношениями, указанными в табл. 2.2.

Данные для табл. 2.2 получены обобщением действующей документации и каталогов. Получив через приведенные соотношения наружный диаметр, определяем диаметр по изоляции, как указано выше.

Для определения максимальных возможностей кабеля по диапазону частот обычно определяют критическую частоту, значение которой связано с длиной периметра проводников. Для первоначальной оценки может использоваться табл. 2.3, в которой даются критические частоты коаксиального кабеля классической конструкции со сплошной изоляцией и $Z_B = 50$ Ом. Замена сплошной изоляции на полувоздушную

Таблица 2.2. Соотношение между радиусом изгиба и наружным диаметром кабеля

Тип кабеля	Условия эксплуатации	Минимальный радиус изгиба
Гибкие	Фиксированный монтаж	$R_{изг} = 5d_{нар}$
	Отделные изгибы	$R_{изг} = 10d_{нар}$
	Постоянные изгибы	$R_{изг} = 20d_{нар}$
Полужесткие классические без оболочки	Фиксированный монтаж	$R_{изг} = 3d_{нар}$
	Фиксированный монтаж	$R_{изг} = 10d_{нар}$
Полужесткие с гофрированным внешним проводником	Фиксированный монтаж	$R_{изг} = (20 \div 35)d_{нар}$
	Отделные изгибы	$R_{изг} = (20 \div 35)d_{нар}$

Таблица 2.3. Критические частоты коаксиальных радиочастотных кабелей при $Z_B = 50 \text{ Ом}$, $\epsilon = 2$, $\xi = \sqrt{2}$

Диаметр по изоляции, мм	0,3	1,0	1,5	2,95	4,6	7,25	17	33	78	120
Критическая частота, ГГц	340	102	68	35	22	14	6	3	1,3	0,85

и воздушную увеличивает критические частоты примерно во столько раз, во сколько уменьшается коэффициент укорочения длины волны.

Для расчета конструкции кабеля помимо диаметра по изоляции и волнового сопротивления надо знать либо эквивалентную диэлектрическую проницаемость, либо диаметр внутреннего проводника. Как правило, на основе выбранной конструктивной схемы кабеля задаются характерным значением диэлектрической проницаемости.

Характерные значения эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{эк}$ при следующих исполнениях изоляции кабеля:

Сплошная полиэтиленовая (РК 50-1, 5-11, РК 75-4-11) . . .	2,3
Сплошная фторопластовая (РК 50-1, 5-21, РК 50-7-21) . . .	2,0
Пористая или кордально-трубчатая полу воздушная полиэтиленовая (РК 75-3, 7-31, РК 75-7-37)	1,5
Воздушная из прямоугольного полиэтиленового корделя (РК 50-7-58, РК 50-17-51)	1,1

После задания конструктивной схемы, свойств материалов и присоединительных параметров можно приступить к расчету конструкции и параметров кабеля. Методы этих расчетов достаточно хорошо разработаны (см. гл. 3). Здесь мы дадим только краткие указания по рекомендуемой последовательности расчетов (см. также рис. 2.1).

1. С учетом выбранной конструктивной схемы задаться коэффициентами формы проводников и произвести расчет диаметра внутреннего

проводника. Теперь, имея размеры проводников, мы можем определить расчетное значение эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{ср}}$, что особенно важно для полувоздушной изоляции и при наличии зазоров. Далее в несколько циклов производим вычисления размеров и параметров. При этих вычислениях принимаются во внимание дискретные ряды диаметров проволоки, диаметров по изоляции, толщин лент. Получаем ряд расчетных значений волнового сопротивления $Z_{\text{вр1}} \div Z_{\text{врn}}$.

Из этого ряда выбирается конструкция, для которой разница между номинальным и расчетным значениями волнового сопротивления $Z_{\text{вн}} - Z_{\text{вр}}$ является оптимальной. Если не удается получить оптимальную разницу, то необходимо изменить диаметр по изоляции или конструктивную схему кабеля и все повторить.

2. По аналогии с выбранным прототипом, а также с учетом стандартов и ТУ выбрать конструкцию оболочки или защитных покровов (радиальные толщины слоев, диаметры проволок оплетки, номера нитей).

3. Произвести расчет масс и уточнение размеров всех элементов и кабеля в целом. Произвести проверку выполнения ТТ.

4. Задаться значениями коэффициентов скрутки, оплетки и защитных покрытий для проводников, тепловыми сопротивлениями изоляции, оболочки, окружающей среды. Задать температурный режим эксплуатации. Рассчитать значения коэффициента затухания при нормальной температуре и номинальной мощности на входе. Произвести проверку выполнения ТТ по условиям: $a_p < a_n$ и $P_p < P_n$.

Если ТТ не выполняются, произвести корректировку конструкции, диаметра по изоляции или конструктивной схемы. Как правило, при этом следует повторить вычисления по пп. 1–3. Увеличение диаметра по изоляции уменьшает коэффициент затухания и увеличивает номинальную мощность, но увеличивает также габариты и массу.

5. Произвести расчет зависимости электрических параметров от температуры, частоты, давления и других воздействий окружающей среды.

6. По аналогии с прототипом назначить значения параметров, для которых отсутствуют методы расчетов.

7. Составить параметрическую модель разрабатываемого кабеля на основе рассчитанных и заданных по аналогии параметров и проверить ее на соответствие ТТ.

8. Произвести прогнозирование возможных отклонений основных электрических параметров (прежде всего волнового сопротивления) за счет технологических колебаний размеров и свойств элементов кабеля. По результатам расчета устанавливаются допуски на размеры и электрические параметры.

9. При необходимости произвести расчет параметров второй группы, т.е. коэффициентов отражения и стоячей волны, неравномерности частотной зависимости затухания и фазы, которые целиком определяются непостоянством геометрических размеров и свойств элементов кабеля

по длине. По этой причине возможен только статистический прогноз этих параметров для данных длин или их экспериментальное исследование на готовом кабеле. Для прогнозирования указанных параметров необходимо принимать гипотезы о свойствах функций, описывающих изменение поперечных размеров и свойств элементов по длине, т.е. строить гипотезы о свойствах технологического процесса.

10. Дальнейшие действия связаны с выпуском документации, изготовлением и испытанием образцов.

Правильно сконструированный и рассчитанный кабель должен допускать возможность изменения (в определенных пределах) размеров отдельных элементов с целью коррекции конструкции при изменении свойств материалов. Это означает, что допуски на размеры отдельных элементов не должны быть слишком жесткими даже при жестких допусках на волновое сопротивление.

На основании имеющегося опыта конструирования кабелей можно дать следующие рекомендации:

для кабелей с внешними проводниками в виде оплетки следует стремиться к тому, чтобы расчетное $Z_{\text{вр}}$ было возможно ближе к номинальному, $Z_{\text{вр}} - Z_{\text{вн}} \approx 0$;

для кабелей со сварными внешними проводниками и воздушной или полувоздушной изоляцией целесообразно, чтобы $Z_{\text{вр}} - Z_{\text{вн}} = 0,3 \div 0,5$ Ом. В этом случае при изготовлении внешнего проводника будет создана возможность обеспечить плотное обжатие проводником изоляции;

для кабелей с внешними проводниками в виде наложенных продольно гладких или гофрированных лент целесообразно, чтобы $Z_{\text{вр}} - Z_{\text{вн}} = -(0,3 \div 0,8)$ Ом, так как большая часть возможных отклонений размеров кабеля приводит к смещению среднего волнового сопротивления в большую сторону (зазор у внешнего проводника);

для кабелей с внешними проводниками в виде сплошных трубок целесообразно, чтобы $Z_{\text{вр}} - Z_{\text{вн}} = -(0,2 \div 0,4)$ Ом. Это даст возможность изготавливать кабель с меньшим обжатием внешнего проводника и улучшит теплостойкость кабеля.

Задача

ГЛАВА 3

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

3.1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

При анализе электрических процессов в цепях с распределенными параметрами используют телеграфные уравнения. Эти уравнения устанавливают связь между токами и напряжениями при распространении волн электромагнитной энергии вдоль линии. Для вывода уравнений

обычно используют схему замещения, показанную на рис. 3.1. Полагая, что напряжение возбуждающего генератора изменяется во времени по синусоидальному закону, можно записать систему уравнений комплексных амплитуд токов и напряжений, характеризующую уменьшение токов и напряжений по длине линии:

$$\frac{d\underline{U}}{dx} = -\underline{Z}\underline{I}; \quad (3.1)$$

$$\frac{d\underline{I}}{dx} = -\underline{Y}\underline{U}, \quad (3.2)$$

где \underline{Z} – полное сопротивление; \underline{Y} – полная поперечная проводимость линии на единицу длины.

Если предположить, что \underline{Z} и \underline{Y} постоянны по длине линии и указанные уравнения продифференцировать по x , то после разделения переменных

$$\frac{d^2\underline{U}}{dx^2} = \gamma^2 \underline{U}; \quad (3.3)$$

$$\frac{d^2\underline{I}}{dx^2} = \gamma^2 \underline{I}; \quad (3.4)$$

где $\gamma = \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}}$ – коэффициент распространения.

Решение уравнения (3.3) для напряжения имеет вид

$$\underline{U} = A e^{-\gamma x} + B e^{\gamma x}. \quad (3.5)$$

Дифференцируя уравнение (3.5) и подставляя в (3.1), получаем уравнение для тока:

$$\underline{I} = \frac{\gamma}{\underline{Z}} A e^{-\gamma x} - \frac{\gamma}{\underline{Z}} B e^{\gamma x}. \quad (3.6)$$

Первые слагаемые в уравнениях (3.5), (3.6) представляют собой амплитуды напряжения и тока падающей волны, распространяющейся по

линии от начала к концу. Вторые слагаемые описывают амплитуды напряжения и тока отраженной волны, распространяющейся от конца к началу линии [1].

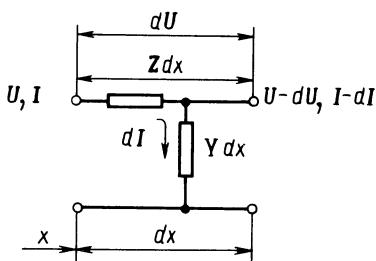


Рис. 3.1. Эквивалентная схема замещения бесконечно малого отрезка линии

Следовательно,

$$\underline{U} = \underline{U}_{\text{пад}} + \underline{U}_{\text{отр}}; \quad (3.7)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_{\text{пад}} - \underline{I}_{\text{отр}}. \quad (3.8)$$

Заметим, что отношения напряжений и токов падающих и отраженных волн

$$\frac{\underline{U}_{\text{пад}}}{\underline{I}_{\text{пад}}} = \frac{\underline{U}_{\text{отр}}}{\underline{I}_{\text{отр}}} = \frac{\underline{Z}}{\gamma} = \frac{\underline{Z}}{\sqrt{\underline{Z} \underline{Y}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}}.$$

Параметр $\sqrt{\underline{Z}/\underline{Y}}$ называют *волновым сопротивлением* линии и обозначают \underline{Z}_B .

Таким образом, коэффициент распространения определяет изменение амплитуды и фазы токов и напряжений падающей или отраженной волн вдоль линии. Волновое сопротивление определяет отношение напряжения к току в любом сечении линии для падающей или отраженной волн:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}/\underline{Y}}, \quad (3.9)$$

где $\underline{Z} = R + i\omega L$; $\underline{Y} = G + i\omega C$; R – активное сопротивление; L – индуктивность; G – проводимость; C – емкость линии на единицу длины,

$$\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}; \quad \underline{Z}_B = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} \quad (3.10)$$

Комплексный коэффициент распространения можно представить в виде

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

При $\omega L/R \geq 3,5$ и $\omega C/G \geq 3,5$ с погрешностью менее 1% можно записать

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad \beta = \omega \sqrt{LC},$$

где α – коэффициент затухания; β – коэффициент фазы.

Волновое сопротивление обычно представляют в виде [1, 16]

$$\underline{Z}_B = |\underline{Z}_B| e^{j\varphi}, \quad (3.11)$$

где $|\underline{Z}_B|$ – модуль и φ – аргумент волнового сопротивления.

Как правило, в радиочастотных линиях передачи $\alpha \ll \beta$, поэтому можно определить длину волны в линии из условия

$$\beta\lambda = 2\pi; \quad \lambda = 2\pi/\beta. \quad (3.12)$$

Предположим, что в начале линии при $x = 0$; $\underline{U} = \underline{U}_0$; $\underline{I} = \underline{I}_0$, тогда

из (3.5) и (3.6) найдем постоянные интегрирования A и B :

$$\underline{U}_0 = A + B; \quad \underline{I}_0 = \frac{A}{Z_B} - \frac{B}{Z_B}.$$

Соответственно

$$A = \frac{\underline{U}_0 + \underline{I}_0 Z_B}{2}; \quad B = \frac{\underline{U}_0 - \underline{I}_0 Z_B}{2}.$$

После подстановки

$$\underline{U} = \frac{\underline{U}_0 + \underline{I}_0 Z_B}{2} e^{-\gamma x} + \frac{\underline{U}_0 - \underline{I}_0 Z_B}{2} e^{\gamma x}; \quad (3.13)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_0 + \underline{I}_0 Z_B}{2Z_B} e^{-\gamma x} - \frac{\underline{U}_0 - \underline{I}_0 Z_B}{2Z_B} e^{\gamma x}. \quad (3.14)$$

Часто удобным оказывается использовать уравнения для токов и напряжений в линии не в виде сумм падающих и отраженных волн, как в уравнениях (3.13) и (3.14), а в виде выражений с гиперболическими функциями. Учитывая, что $(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 = \operatorname{ch} \gamma x$, а $(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2 = \operatorname{sh} \gamma x$, уравнения можно записать так:

$$\underline{U} = \underline{U}_0 \operatorname{ch} \gamma x - \underline{I}_0 Z_B \operatorname{sh} \gamma x; \quad (3.15)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_0 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\underline{U}_0}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma x. \quad (3.16)$$

С помощью этих двух уравнений можно решать все основные задачи передачи электромагнитных волн по линии.

Входное сопротивление отрезка линии длиной l , нагруженной на комплексное сопротивление Z_l (рис. 3.2), представляющее собой отношение напряжения к току в начале линии $Z_{Bx} = \underline{U}_0/\underline{I}_0$, можно найти из уравнений (3.15), (3.16), имея в виду, что

$$\underline{U}_l \underline{I}_l = Z_l;$$

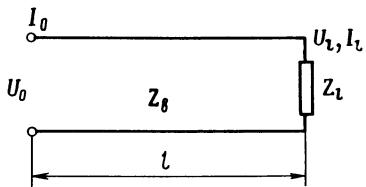
$$\underline{U}_l = \underline{U}_0 \operatorname{ch} \gamma l - \underline{I}_0 Z_B \operatorname{sh} \gamma l;$$

$$\underline{I}_l = \underline{I}_0 \operatorname{ch} \gamma l - \frac{\underline{U}_0}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l.$$

После преобразований

$$Z_{Bx} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0} = Z_B \frac{Z_l \operatorname{ch} \gamma l + Z_B \operatorname{sh} \gamma l}{Z_B \operatorname{ch} \gamma l + Z_l \operatorname{sh} \gamma l} = Z_B \frac{Z_l + Z_B \operatorname{th} \gamma l}{Z_B + Z_l \operatorname{th} \gamma l}. \quad (3.17)$$

Рис. 3.2. Линия, нагруженная на комплексное сопротивление



Если линия нагружена на сопротивление $Z_l = Z_B$ ("согласованная нагрузка"), то

$$Z_{Bx} = Z_B. \quad (3.18)$$

Если $Z_l = 0$ – линия на конце разомкнута (режим холостого хода), то

$$Z_{Bx}^{x.x} = Z_B \operatorname{cth} \gamma l. \quad (3.19)$$

Если $Z_l = \infty$ – линия на конце замкнута (режим короткого замыкания), то

$$Z_{Bx}^{k.3} = Z_B \operatorname{th} \gamma l. \quad (3.20)$$

Коэффициент отражения волны в линии. Как следует из общего решения уравнений распространения электромагнитных волн, в линиях передачи существуют падающие и отраженные волны. Важнейшим параметром, характеризующим качество тракта, является отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны в заданном (любом) сечении линии. Это отношение принято называть коэффициентом отражения Γ . Для произвольного сечения x

$$\Gamma = \underline{U}_{\text{отр}} / \underline{U}_{\text{пад.}}$$

Для линии, нагруженной на комплексное сопротивление Z_l в сечении $x = l$, справедливы формулы

$$\underline{U}_l = \underline{U}_l \text{пад} + \underline{U}_l \text{отр};$$

$$\underline{I}_l = \underline{I}_l \text{пад} - \underline{I}_l \text{отр}.$$

Учитывая, что

$$\underline{U}_l / \underline{I}_l = Z_l; \quad \underline{I}_l \text{пад} = \frac{\underline{U}_l \text{пад}}{Z_B}; \quad \underline{I}_l \text{отр} = \frac{\underline{U}_l \text{отр}}{Z_B},$$

получим

$$\begin{aligned} \underline{U}_l \text{пад} &= \frac{\underline{U}_l + I_l Z_B}{2}; \quad \underline{U}_l \text{отр} = \frac{\underline{U}_l - I_l Z_B}{2}; \\ \Gamma_l &= \frac{\underline{U}_l \text{отр}}{\underline{U}_l \text{пад}} = \frac{Z_l - Z_B}{Z_l + Z_B}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Из выражения (3.21) следует, что комплексный коэффициент отражения на дальнем конце линии зависит только от волнового сопротивления линии и сопротивления нагрузки.

На входе линии, нагруженной на сопротивление Z_l , в сечении $x = 0$ также справедливы формулы

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_0 \text{пад} + \underline{U}_0 \text{отр};$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_0 \text{пад} - \underline{I}_0 \text{отр}.$$

Учитывая, что $\underline{U}_0/\underline{I}_0 = Z_{\text{вх}}$; $\underline{U}_0 \text{пад}/\underline{I}_0 \text{пад} = Z_b$; $\underline{U}_0 \text{отр}/\underline{I}_0 \text{отр} = Z_b$, получаем

$$\Gamma_0 = \frac{\underline{U}_0 \text{отр}}{\underline{U}_0 \text{пад}} = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_b}{Z_{\text{вх}} + Z_b}. \quad (3.22)$$

Здесь Z_b относится к линии, подводящей электромагнитную волну к отрезку кабеля (т.е. при $x < 0$).

Входное сопротивление линии можно определить с помощью измерителей комплексных сопротивлений и приборов, позволяющих измерять входные коэффициенты отражения, — частотных рефлектометров. В первом случае комплексное входное сопротивление определяется непосредственно с помощью мостовых схем, а во втором — падающие и отраженные волны разделяются с помощью направленных ответвителей и определяется отношение их амплитуд (обычно в децибелах). Поскольку входное сопротивление и коэффициент отражения имеют однозначную связь, обычно все приборы имеют градуировку и в коэффициентах отражения (в децибелах). Следует отметить, что измерители комплексных сопротивлений позволяют определять и модуль и фазы коэффициента отражения, в то время как рефлектометры измеряют только модуль.

Коэффициент передачи линии. Выразим напряжение и ток в линии, нагруженной на комплексное сопротивление Z_l , через волновое сопротивление линии и сопротивление нагрузки. Используя уравнения (3.15), (3.16) и учитывая, что $\underline{U}_0/\underline{I}_0 = Z_{\text{вх}}$, получаем

$$\underline{U} = \underline{U}_0 (\operatorname{ch} \gamma x - \frac{Z_b}{Z_{\text{вх}}} \operatorname{sh} \gamma x);$$

$$\underline{I} = \underline{I}_0 (\operatorname{ch} \gamma x - \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_b} \operatorname{sh} \gamma x).$$

После преобразований с учетом (3.17) получим

$$\underline{U} = \underline{U}_0 \frac{Z_l \operatorname{ch} \gamma(l-x) + Z_b \operatorname{sh} \gamma(l-x)}{Z_l \operatorname{ch} \gamma l + Z_b \operatorname{sh} \gamma l}; \quad (3.23)$$

$$I = I_0 \frac{Z_B \operatorname{ch} \gamma(l-x) + Z_l \operatorname{sh} \gamma(l-x)}{Z_B \operatorname{ch} \gamma l + Z_l \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (3.24)$$

Из этих уравнений при $x = l$ можно ввести понятия комплексных коэффициентов передачи линии по току и по напряжению:

$$K_U = \frac{U_l}{U_0} = \frac{Z_l}{Z_l \operatorname{ch} \gamma l + Z_B \operatorname{sh} \gamma l}; \quad (3.25)$$

$$K_I = \frac{I_l}{I_0} = \frac{Z_B}{Z_B \operatorname{ch} \gamma l + Z_l \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (3.26)$$

Параметры тракта, составленного из отрезков линий и сосредоточенных комплексных сопротивлений. Рассмотрим кабельный тракт, состоящий из отрезков линий передачи с различными волновыми сопротивлениями, нагруженный на комплексное сопротивление (рис. 3.3, а). Следует отметить, что тракт из отрезков линий с разными волновыми сопротивлениями на практике реализовать трудно, так как в местах соединений отрезков неизбежно возникает нарушение однородности электромагнитного поля, что в терминах данной теории эквивалентно включе-

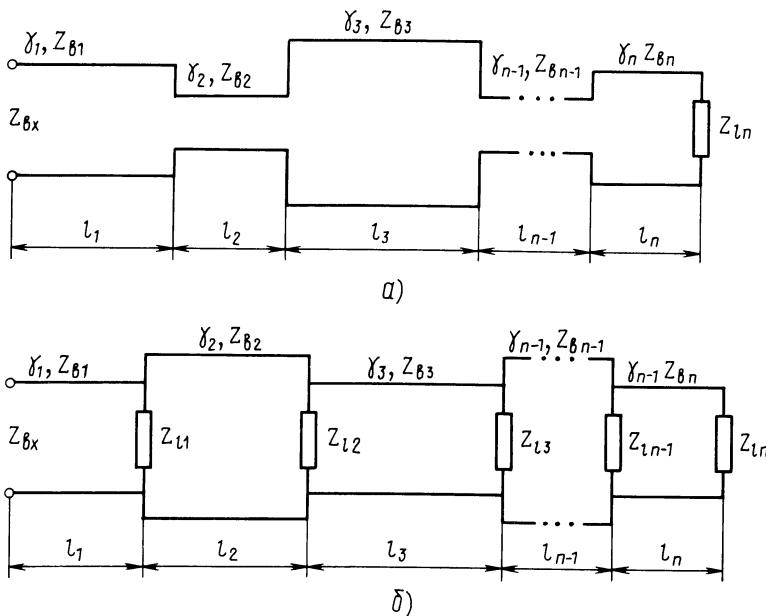


Рис. 3.3. Кабельные тракты, состоящие из отрезков линий с различным волновым сопротивлением (а) и отрезков линий и сосредоточенных элементов (б)

нию сосредоточенных комплексных сопротивлений. Это соответствует схеме рис. 3.3, б. Однако первая модель оказывается полезной при анализе нерегулярных линий и электромагнитных полей в многослойных проводниках.

Запись выражений для схемы на рис. 3.3, а сводится к рекуррентным формулам.

Действительно, если начать вычисления с последнего отрезка линии длиной l_n , с параметрами Z_{bn} , γ_n , нагруженного на Z_{ln} , то входное сопротивление этого отрезка выражается формулой (3.17), т.е.

$$Z_{bxn} = Z_{bn} \frac{Z_{ln} + Z_{bn} \operatorname{th} \gamma_n l_n}{Z_{bn} + Z_{ln} \operatorname{th} \gamma_n l_n} .$$

Для участка $n - 1$ входное сопротивление n -го отрезка будет представлять собой сопротивление нагрузки.

Тогда общая расчетная формула будет иметь вид

$$Z_{l(i-1)} = Z_{bi} \frac{Z_{li} + Z_{bi} \operatorname{th} \gamma_i l_i}{Z_{bi} + Z_{li} \operatorname{th} \gamma_i l_i} . \quad (3.27)$$

Здесь i должно меняться от n до 1. При $i = n$ Z_{ln} равняется сопротивлению окончной нагрузки. Далее расчеты проводятся подстановкой Z_{li} , вычисленного на предыдущем шаге. По окончании расчетов на шаге $i = 1$ будет определено Z_{l0} , которое и будет представлять собой Z_{bx} составной линии. Если на каждом шаге вычислять и коэффициенты передачи по напряжению (или току) по формулам (3.25) и (3.26) :

$$K_{Ui} = \frac{U_{li}}{U_{oi}} = \frac{Z_{li}}{Z_{li} \operatorname{ch} \gamma_i l_i + Z_{bi} \operatorname{sh} \gamma_i l_i} , \quad (3.28)$$

то коэффициент передачи будет представлять собой произведение всех K_{Ui} от $i = n$ до 1, т.е.

$$K_U = \prod_{i=n}^1 K_{Ui} . \quad (3.29)$$

Если в местах соединений отрезков линий включены сосредоточенные комплексные сопротивления Z_H , то данный алгоритм остается в силе. При этом на каждом шаге следует учитывать, что входное сопротивление i отрезка будет параллельно присоединяться к $Z_{l(i-1)}$.

Приведенный алгоритм расчета комплексного входного сопротивления и коэффициента передачи линии обеспечивает возможность создания простой и гибкой программы для ЭВМ.

Относительно большое количество вычислений, необходимое для его выполнения, окупается возможностью рассчитывать любые тракты без усложнения ввода исходных данных.

3.2. УРАВНЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ НЕРЕГУЛЯРНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Реальные линии передачи (в том числе и коаксиальные кабели) имеют непостоянные по длине значения Z и Y и, следовательно, значения γ и Z_B . Это обусловлено непостоянством геометрических размеров проводников и изоляции и их электрических свойств. Линии с переменными по длине параметрами принято называть нерегулярными. Как правило, непостоянство параметров кабелей по длине невелико и составляет всего единицы, а чаще десятые и сотые доли процента от номинального значения. Следовательно, кабели являются слабонерегулярными линиями. Тем не менее слабое непостоянство размеров и свойств кабеля по длине решительным образом влияет на характер распространения электромагнитных волн и на параметры передачи таких кабелей, особенно если эти изменения носят периодический характер.

Ввиду того что получение общего решения распространения волн в нерегулярных кабелях представляет серьезные математические трудности, в настоящее время относительно подробно изучены только слабонерегулярные кабели.

Если первичные параметры линии Z и Y непостоянны по длине и являются функциями координаты x , т.е. $Z = Z(x)$; $Y = Y(x)$, то дифференциальные уравнения (3.1) и (3.2) примут вид [13]

$$\frac{dU}{dx} = -Z(x)\underline{I};$$

$$\frac{dI}{dx} = -Y(x)\underline{U}.$$

Разделение переменных и подстановка $\Gamma(x)$ преобразует уравнение к виду

$$\frac{d\Gamma(x)}{dx} + 2\gamma(x)\Gamma(x) - N(x)(1 - \Gamma^2(x)) = 0, \quad (3.30)$$

где $\Gamma(x) = U_{\text{отр}}(x)/U_{\text{пад}}(x)$ – коэффициент отражения правого отрезка линии в сечении x ; $\gamma(x) = \sqrt{Z(x)Y(x)}$; $N(x) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln Z_{Bx}(x)$;

$Z_{Bx}(x)$ – входное сопротивление линии в сечении x .

Уравнение вида (3.30) называют уравнением Риккати [13].

Положим, что в любом сечении линии $\Gamma^2(x) \ll 1$, тогда для случая входного коэффициента отражения линии, т.е. при $x = 0$,

$$\Gamma_{Bx} = \Gamma(0) = \int_0^L N(x) e^{-2 \int_0^x \gamma(x) dx} dx, \quad (3.31)$$

где L – длина линии.

Отметим следующее: если $\gamma(x) = \gamma + \Delta\gamma(x)$, где γ – среднее значение коэффициента распространения линии; $\Delta\gamma(x)$ – малые возмущения γ с нулевым средним, то

$$-2 \int_0^x \gamma(x) dx = -2\gamma x - 2 \int_0^x \Delta\gamma(x) dx = -2\gamma x;$$

если $Z_B(x) = Z_B + \Delta Z_B(x)$, то

$$N(x) = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \ln(Z_B + \Delta Z_B(x)) = \frac{1}{2Z_B} \frac{d\Delta Z_B(x)}{dx}.$$

Тогда уравнение (3.31) можно записать в упрощенном виде:

$$\Gamma_{Bx} = \frac{1}{2Z_B} \int_0^L \frac{d}{dx} \Delta Z_B(x) e^{-2\gamma x} dx. \quad (3.32)$$

Данное уравнение позволяет рассчитывать входной коэффициент отражения слабонерегулярной линии с любым законом изменения волнового сопротивления по длине. Основным ограничивающим условием является требование малости результирующего $|\Gamma_{Bx}^2| \ll 1$. Как показали многочисленные исследования и расчеты, вполне приемлемая точность данных формул обеспечивается вплоть до $|\Gamma_{Bx}| < 0,5$. В [13] с использованием (3.32) получены выражения для входного коэффициента слабонерегулярной линии с потерями, с периодическим изменением волнового сопротивления по длине: по синусоидальному, прямоугольному и трапецидальному закону.

Линии с периодическим законом изменения волнового сопротивления по длине при частоте, когда половина длины волны в кабеле λ_K равна

Таблица 3.1. Формулы для расчета коэффициента отражения кабеля с различными формами периодических нерегулярностей

Форма нерегулярностей	Расчетные формулы
	$ \Gamma_{Bx} _{max} = \frac{\pi P_0}{\alpha \lambda} (1 - e^{-2\alpha L})$ при $P_0 = \frac{\Delta Z_B}{2Z_B}; \frac{\lambda}{2} = l$
	$ \Gamma_{Bx} _{max} = 4P_0 \left \sin \frac{\pi m l_1}{l} \right \frac{1 - e^{-2\alpha L}}{2\alpha l}$ при $m \frac{\lambda}{2} = l; P_0 = \frac{\Delta Z_B}{2Z_B}$

Продолжение табл. 3.1.

Форма нерегулярностей	Расчетные формулы
	$ \Gamma_{Bx} _{\max} = \frac{8P_0}{\pi m} \frac{l}{l_1 - l_2} \sin \frac{\pi m(l_1 + l_2)}{2l} \times$ $\times \sin \frac{\pi m(l_1 - l_2)}{2l} \frac{1 - e^{-2\alpha l_1}}{2\alpha l}$ <p>при $\frac{\lambda}{2} = l$; $P_0 = \frac{\Delta Z_B}{2Z_B}$</p>
	$ \Gamma_{Bx} = \frac{2P_0\theta\gamma}{\theta^2 + 4\gamma^2} (1 - e^{-2\gamma L});$ $P_0 = \frac{\Delta Z_B}{2Z_B}; \quad \theta = \frac{2\pi}{l}; \quad \gamma = \alpha + i\beta;$ $f_0 = \frac{c}{2l\xi}; \quad \Delta f = \frac{c}{2L\xi};$ $ \Gamma_{Bx} = 2P_0\theta \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\sqrt{(\theta^2 + 4\alpha^2 - 4\beta^2) + 64\alpha^2\beta^2}} \times$ $\times \sqrt{1 - 2e^{-2\alpha L} \cos 2\beta L + e^{-4\alpha L}}$

В таблице 3.1 приняты следующие обозначения:

$$P_0 = \Delta Z_B / 2Z_B$$

— условный коэффициент отражения единичной нерегулярности (местный коэффициент отражения);

$$l$$

— период нерегулярностей;

$$L$$

— длина линии;

$$\lambda$$

— длина волн в линии;

$$\xi = v / c$$

— коэффициент замедления волны (v — скорость волны в линии, c — скорость волны в вакууме);

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

— коэффициент распространения волны, α — коэффициент затухания, β — коэффициент фазы;

$$|\Gamma_{Bx}|_{\max}$$

— максимальное значение модуля входного коэффициента отражения на резонансной частоте f_0 ;

$$|\Gamma_{Bx}|, |\Gamma_{Bx}|$$

— комплексное значение входного коэффициента отражения и его модуль на произвольной частоте f .

периоду нерегулярности $-l$, имеют на частотной характеристике острый всплеск входного коэффициента отражения.

Расчетные формулы, связывающие параметры периодических нерегулярностей волнового сопротивления, коэффициент распространения ли-

ния и ее длину с максимальным входным коэффициентом отражения, приведены в табл. 3.1. Выражения для $\Gamma_{\text{вх}}$ линии с прямоугольной и трапецидальной формой периодических изменений волнового сопротивления по длине получены путем разложения в ряд Фурье функции изменения волнового сопротивления.

3.3. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ НЕРЕГУЛЯРНОСТЯМИ

Более гибким и наглядным методом анализа нерегулярных линий является метод представления линии в виде ступенчатой модели, т.е. нерегулярной линии, составленной из отрезков регулярной линии с параметрами $Z_{\text{вн}i}$, γ_i , длинами l_i . Число отрезков N может быть достаточно велико. Эта модель хорошо ориентирована на машинные методы расчетов и потенциально может описывать любую реальную нерегулярную линию с заранее заданной точностью путем задания необходимого числа разбиений. Исходя из ступенчатой модели получена большая часть практических результатов. Известны несколько методов определения параметров нерегулярных линий с помощью ступенчатой модели, но все они основываются на следующей предпосылке.

В месте соединения двух отрезков нерегулярных линий $Z_{\text{вн}i}$, γ_i и $Z_{\text{вн}i+1}$, γ_{i+1} возникает отраженная волна, которую можно характеризовать местным коэффициентом отражения от стыка отрезков i и $i+1$ (см. § 3.1):

$$\rho_i = \frac{Z_{\text{вн}i+1} - Z_{\text{вн}i}}{Z_{\text{вн}i+1} + Z_{\text{вн}i}} \approx \frac{\Delta Z_i}{2Z_{\text{ср}}} .$$

По существу эта модель соответствует рис. 3.3, а, т.е. предполагается, что степень отражения от стыка не зависит от длины волны (частотно независима). На самом деле следовало бы рассматривать более точную модель вида 3.3, б. Однако при малых ΔZ_i величина Z_{li} не оказывает существенного влияния на результаты расчетов.

В настоящее время основное развитие получили следующие методы расчетов характеристик нерегулярных линий с помощью ступенчатой модели:

1) прямого векторного суммирования отраженных и переотраженных волн от стыков отрезков линий (в том числе и при условном разбиении линии на отрезки);

2) матричных коэффициентов, когда кабель представляется в виде каскадного соединения четырехполюсников.

Метод векторного суммирования обладает наибольшей наглядностью и легкостью восприятия физической картины процесса суммирования отраженных и переотраженных волн. На его основе рассмотрим основные закономерности распространения волн в нерегулярных линиях.

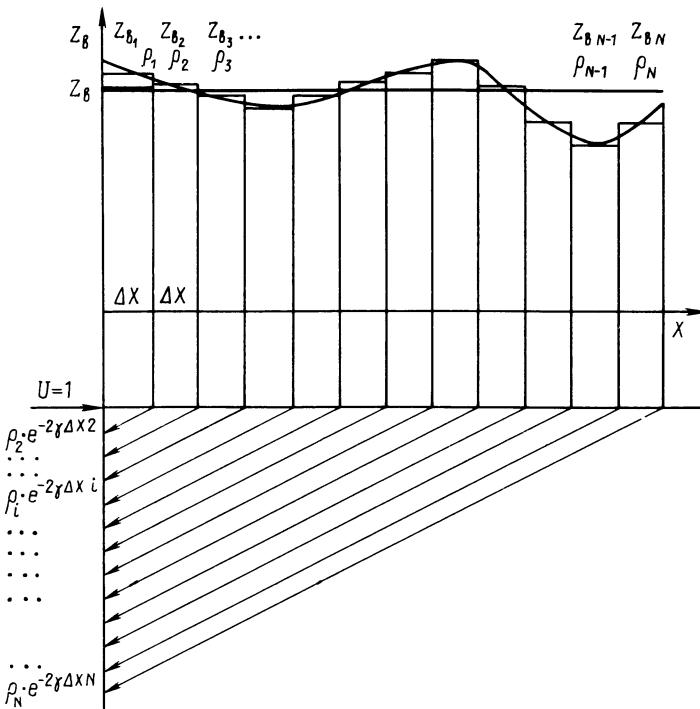


Рис. 3.4. Схема образования отраженных волн в нерегулярном кабеле

На рис. 3.4 показана схема образования отраженных волн в слабонерегулярной линии с плавно меняющимся по длине волновым сопротивлением. Линия разбита на N отрезков длиной $\Delta X = L/N$, где L – длина линии. Для каждого отрезка ΔX_i принято Z_{Bi} , равное среднему Z_B на этом отрезке. Таким образом, получена гирлянда из отрезков линии с разными Z_{Bi} . Если пренебречь тем, что падающая волна ослабляется вследствие отражения от отдельных ступенек (условие слабой нерегулярности), то можно записать

$$\Gamma_{Bx} \approx \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-2\gamma \Delta \tilde{X}_i} \approx \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-2\alpha \Delta x_i} e^{-2j\beta \Delta x_i},$$

где

$$\rho_i \approx \frac{Z_{Bi+1} - Z_{Bi}}{Z_{Bi+1} + Z_{Bi}} \approx \frac{\Delta Z_i}{2Z_B} \approx \frac{1}{2Z_B} \frac{dZ_B}{dx} \Delta x.$$

Тогда при увеличении числа разбиений в пределе получим

$$\begin{aligned}\Gamma_{\text{вх}} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2Z_B} \frac{dZ_B}{dx} \Delta x e^{-2\gamma \Delta xi} = \\ &= \frac{1}{2Z_B} \int_0^L \frac{dZ_B}{dx} e^{-2\gamma x} dx,\end{aligned}$$

так как $\Delta xi = x$.

Полученное уравнение совпадает с (3.32). Это значит, что данные уравнения представляют собой выражения для расчета отражений первого порядка и не учитывают ослабление падающей волны за счет отражения.

Для случая периодического изменения волнового сопротивления по длине линии (рис. 3.5, а, б) при $\lambda/2 = l$, где λ — длина волны в линии, т.е. при $\beta l = \pi$, все отраженные волны сложатся в фазе и модуль входного коэффициента будет максимален (рис. 3.5, б).

Графическое сложение векторов отраженных волн, показанное на рис. 3.5, б при разных соотношениях λ и l , наглядно позволяет представить картину изменения $\Gamma_{\text{вх}}$. Условие, при котором отраженные волны от всех стыков приходят в фазе, тем более чувствительно к изменению частоты, чем длиннее кабель (чем больше периодов нерегулярностей уложится на его длине). Для кабеля без потерь по мере удаления от резонансной частоты сумма векторов как бы сворачивается в окружность, проходящую через начало координат. Это приводит к тому, что модуль суммарного вектора осциллирует относительно нуля, постепенно уменьшаясь по мере удаления частоты от f_0 .

Метод матричных коэффициентов. В соответствии с этим методом отрезок линии Δx представляется в виде четырехполюсника, параметры которого описываются коэффициентами нормированных волновых матриц передачи или рассеяния.

Линию передачи, в свою очередь, можно представить в виде каскадного соединения четырехполюсников. Методы исследования цепочек четырехполюсников, в том числе и линии с непрерывно меняющимися параметрами, детально разработаны в [22]. Используя эти методы в [13], исследованы характеристики линий с синусоидальными изменениями волнового сопротивления по длине.

Максимальное изменение частотной характеристики затухания нерегулярного кабеля с синусоидальным изменением волнового сопротивления по длине можно представить в виде суммы затухания регулярного кабеля и добавки $\Delta\alpha$ за счет резонансного отражения:

$$(\alpha_h L)_{\max} = \alpha L + 20 \lg \left[1 + \frac{P_0^2 \pi^2}{2\alpha l} \frac{L}{l} \left(1 - \frac{1 - e^{-2\alpha L}}{2\alpha L} \right) \right]. \quad (3.33)$$

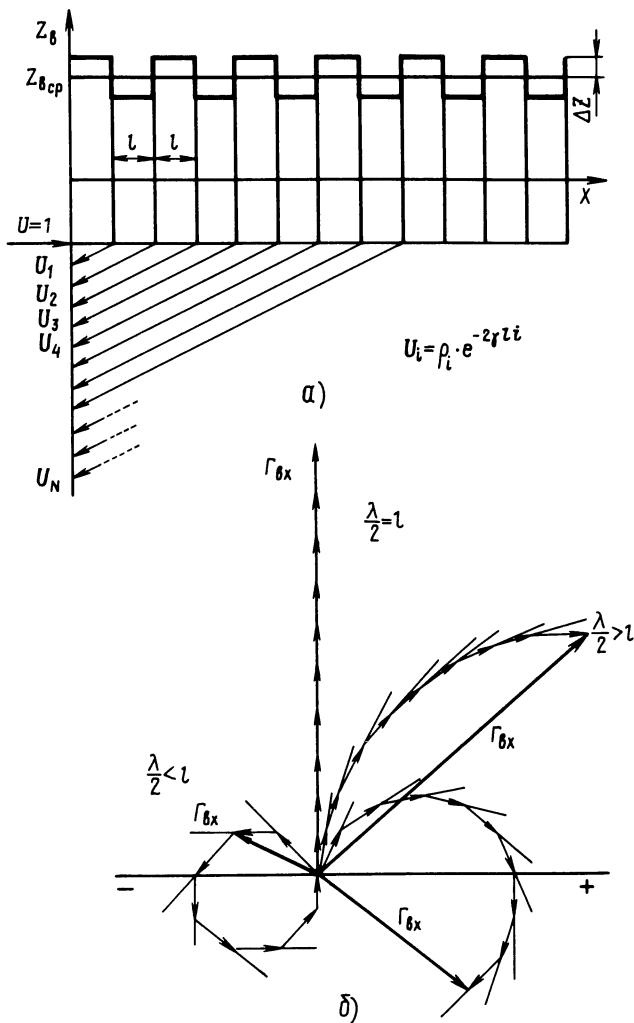


Рис. 3.5. Схема сложения отраженных волн от периодических нерегулярностей

Это выражение представляют в виде $(\alpha_H L)_{\max} = \alpha L + (\Delta \alpha L)_{\max}$; тогда с учетом табл. 3.1

$$(\Delta \alpha_H L)_{\max} = 20 \lg \left[1 + |\Gamma_{\delta x \max}|^2 \frac{2\alpha L - (1 - e^{-2\alpha L})}{(1 - e^{-2\alpha L})^2} \right], \quad (3.34)$$

где α — в неперах; $\Delta \alpha_H$ — в децибелах.

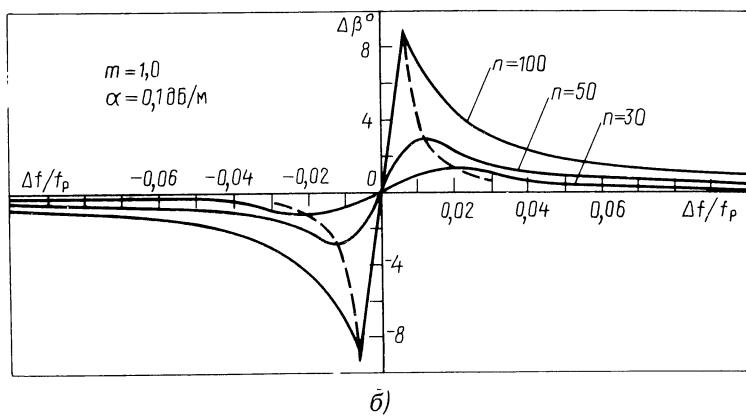
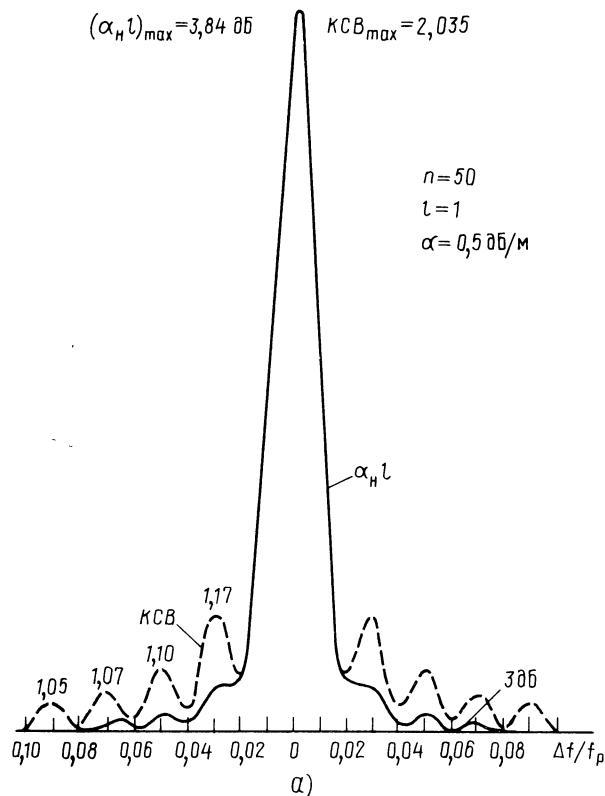
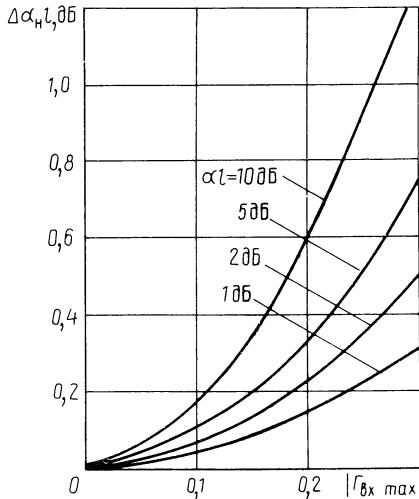


Рис. 3.6. Частотная зависимость добавки к коэффициентам затухания (а) и фазы (б) кабеля с периодическими нерегулярностями (n – число нерегулярностей; l и m определяются по табл. 3.1)

Рис. 3.7. Максимальная добавка затухания за счет периодических нерегулярностей в зависимости от входного коэффициента отражения и общего затухания кабеля

На рис. 3.6 показан характер частотной зависимости добавки затухания нерегулярного кабеля за счет резонансных отражений от периодических нерегулярностей и соответствующего скачка фазы прошедшей волны. На рис. 3.7 приведены расчетные значения максимальной добавки ($\Delta\alpha_H L$) в зависимости от $|\Gamma_{\text{вх max}}|$ и затухания регулярного кабеля.

Частотные характеристики нерегулярных радиочастотных кабелей (ими являются все реальные кабели) принято оценивать дополнительными параметрами – неравномерностью частотной характеристики затухания и дисперсией фазочастотной характеристики (ФЧХ). Эти параметры определяют отличие частотных характеристик нерегулярной реальной линии от идеальной регулярной линии с затуханием. По-видимому, целесообразно ввести единую терминологию (тем более что в [1, 13], например, эти же параметры называют и нестабильностью, и дисперсией затухания) и применить единый термин *неравномерность ФЧХ и затухания*. Последнее точнее называть неравномерностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Этим подчеркивается, что как АЧХ, так и ФЧХ регулярной линии изменяются равномерно (плавно) с частотой, а нерегулярной – неравномерно, с местными скачками.



3.4. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ СО СЛУЧАЙНЫМИ НЕРЕГУЛЯРНОСТЯМИ

Квазипериодические нерегулярности. Ступенчатая модель нерегулярной линии позволяет рассмотреть и более сложные законы изменения волнового сопротивления по длине. На практике строго периодических нерегулярностей не существует. Как правило, эти нерегулярности вызываются технологическими причинами и о периодичности можно говорить только в смысле постоянства среднего значения, т.е. имеют место квазипериодические нерегулярности.

В [13] рассмотрено влияние непостоянства периода на модели линии со ступенчатым законом изменения волнового сопротивления по длине типа "меандр" (табл. 3.1, вторая строка).

В предположении, что период нерегулярности l распределен по гауссовскому закону со средним \bar{l} и среднеквадратическим σ_l , получено

$$\Delta\alpha_h l = 8,7 \Gamma_{\text{вхmax}}^2 \left[\frac{n}{2h} - \frac{1}{4h^2} (1 - e^{-2nh}) \right]; \quad (3.35)$$

$$\Delta\beta_h l = 17,5 \Gamma_{\text{вхmax}}^2 \left[\frac{n}{2h} - \frac{1}{4h^2} (1 - e^{-2nh}) \right], \quad (3.36)$$

где $h = a\bar{l} + [(m\pi\sigma_l)/\bar{l}]^2$; m – номер резонанса; $n = L/\bar{l}$ – число нерегулярностей.

Влияние непостоянства периода нерегулярностей типа "меандр" показано на рис. 3.8, из которого следует, что даже незначительное непостоянство периода в 3–5% уменьшает значения максимального входного коэффициента отражения и выбросов АЧХ и ФЧХ в 3–5 раз.

Частотные характеристики линии со случайными нерегулярностями. Наиболее близка реальным линиям передачи модель линии, в которой нерегулярности размещены случайным образом, т.е. амплитуды коэффициентов отражения подчиняются гауссовскому закону, а их фазы равновероятно распределены от 0 до 2π . Такая задача решена в [23], где получено, что модуль входного коэффициента отражения большого числа отрезков кабелей одинаковой длины, измеренных на одной частоте, подчиняется распределению Релея, плотность вероятности которого

$$w(\Gamma) = (\Gamma/\Gamma_m^2) e^{-(\Gamma^2/2\Gamma_m^2)}, \quad (3.37)$$

и функция распределения

$$W(\Gamma_p < \Gamma) = 1 - e^{-(\Gamma^2/2\Gamma_m^2)}.$$

Наиболее вероятное значение модуля входного коэффициента отражения

$$|\Gamma_m| \approx \sqrt{\frac{\bar{\rho}_i^2 (1 - e^{-4aL})}{8a\bar{d}\bar{l}}}, \quad (3.38)$$

где $\bar{\rho}_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i^2$ – средний квадрат местных коэффициентов отражения; $\bar{d}\bar{l}$ – среднее расстояние между нерегулярностями; L – длина кабеля.

Если использовать ступенчатую модель нерегулярного кабеля, то получим, что фаза коэффициентов отражения равновероятна от 0 до 2π , т.е. $\bar{\varphi}_{\text{ср}} = \pi$. При этом отражение от малых ступенек Z_b чисто активное, т.е. $\rho_i = \Delta Z_i / 2Z_b$, и можно определить эквивалентное среднее рассто-

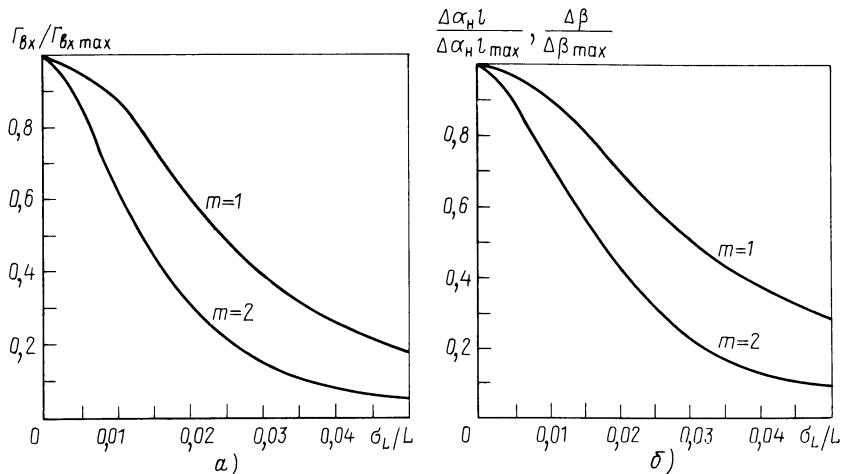


Рис. 3.8. Максимальная добавка в коэффициенты затухания (а) и фазы (б) нерегулярного кабеля в зависимости от среднеквадратического значения разброса периода нерегулярностей

жение между стыками отдельных отрезков случайной длины:

$$\beta \overline{\Delta l} = \pi, \quad (3.39)$$

отсюда $\overline{\Delta l} = \lambda/2$.

В кабеле на каждой частоте значение входного коэффициента отражения формируется суммированием большого количества отраженных волн и поэтому можно предположить, что существует такой интервал δf , в котором значения $|\Gamma_{\theta x}(f)|$ на частотах f_0 и $f_0 + \delta f$ можно считать независимыми. Такой подход дает возможность использовать выражения (3.37) и (3.38) для оценки входного коэффициента отражения образца в полосе частот, а не только многих образцов на одной ч. С учетом (3.39) можно записать

$$|\Gamma_m| = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 (1 - e^{-4\alpha L})}{4\alpha \lambda}}. \quad (3.40)$$

Здесь вместо $\bar{\rho}_i^2$ (среднеквадратического значения местного коэффициента отражения) принято \bar{P}_i^2 , представляющее собой отражение отрезка линии длиной $\lambda/2$.

Таким образом, основное отличие частотных характеристик кабеля со случайными нерегулярностями состоит в том, что их можно описать только в вероятностных терминах.

На рис. 3.9 показана типичная частотная зависимость коэффициента отражения линии со случайными нерегулярностями.

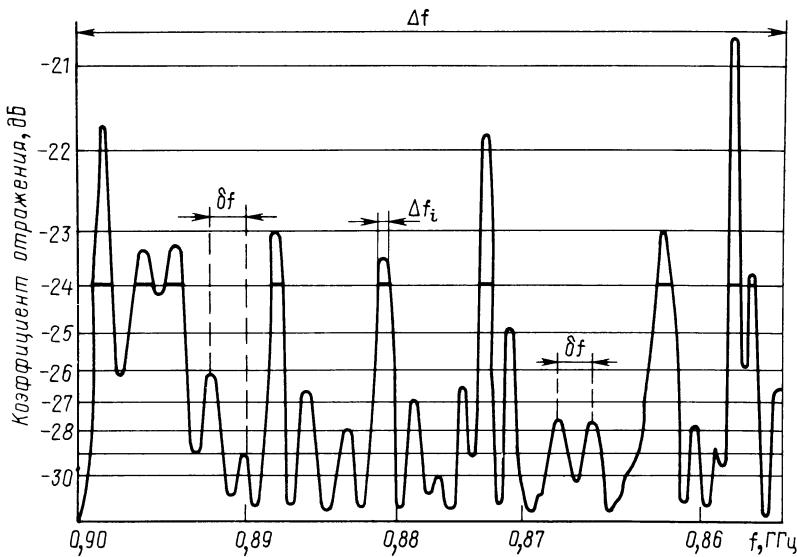


Рис. 3.9. Типичная частотная зависимость входного коэффициента отражения линии со случайными нерегулярностями

Если использовать понятие функции распределения, то она будет означать вероятность пребывания коэффициента отражения ниже заданного уровня, т.е.

$$W(\Gamma_p < \Gamma) = \sum_{i=1}^n \Delta f_i \cdot$$

Обозначения в данной формуле понятны из рис. 3.9.

Если ввести понятие вероятности пребывания значения коэффициента отражения выше заданного уровня, т.е.

$$\bar{W}(\Gamma) = 1 - W(\Gamma_p - \Gamma) = e^{-\frac{\Gamma^2}{2\Gamma_m}} , \quad (3.41)$$

и прологарифмировать (3.41) дважды, то

$$R = 20 \lg \Gamma = 20 \lg \sqrt{4,6 \Gamma_m} + 10 \lg (-\lg \bar{W}) , \quad (3.42)$$

где R – отражение, дБ.

По формуле (3.42) при известной величине Γ_m можно определить значение Γ , которое не будет превышено с заданной вероятностью. Урав-

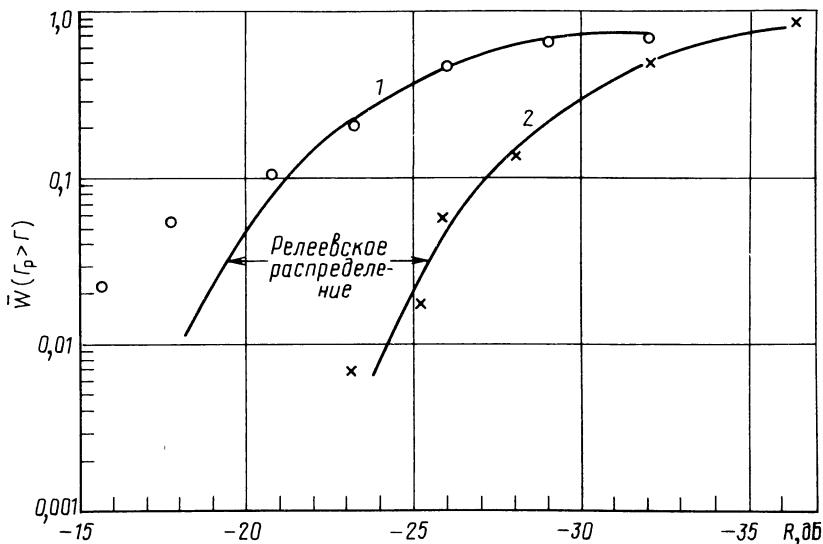


Рис. 3.10. Функции распределения входного коэффициента отражения кабеля с некалиброванной (1) и калиброванной (2) изоляциями

нение (3.42) в координатах W от R описывает кривую, не меняющую своей формы при любых значениях Γ_m и только смещающуюся параллельно самой себе. Заметим, что при $W = 0,1$ $10 \lg (-\lg W) = 0$. Обозначим значение при вероятности 0,1 как $R_{0,1}$, тогда

$$R_{0,1} = 20 \lg \sqrt{4,6} \Gamma_m;$$

$$R_{0,1} = 20 \lg \sqrt{4,6 P_i^2} + 20 \lg \sqrt{\frac{1 - e^{-4aL}}{4aL}}. \quad (3.43)$$

На рис. 3.10 приведены функции распределения $W(\Gamma)$ в полосе частот кабелей с калиброванной и некалиброванной изоляцией, из которого видно, что калибровка изоляции кабеля, т.е. снижение нерегулярности кабеля, приводит к смещению вероятностной кривой в сторону уменьшения $R_{0,1}$. Это смещение происходит за счет уменьшения первого члена формулы (3.43). Значение $R_{0,1}$ зависит также от частоты. Обычно кабели со сплошной изоляцией имеют экстремум $R_{0,1}$ на частотах 1–5 ГГц (рис. 3.11).

Второй член этой формулы учитывает влияние коэффициента затухания кабеля. Чем меньше затухание, тем больше второй член формулы, следовательно, большее вероятность появления больших значений Γ .

Аналогично получены выражения, характеризующие неравномерность коэффициента передачи. В [13] приведено выражение для дополнитель-

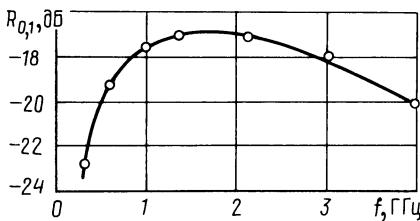


Рис. 3.11. Частотная зависимость значения входного коэффициента отражения на уровне вероятности 0,1 для кабеля РК 75-4-11

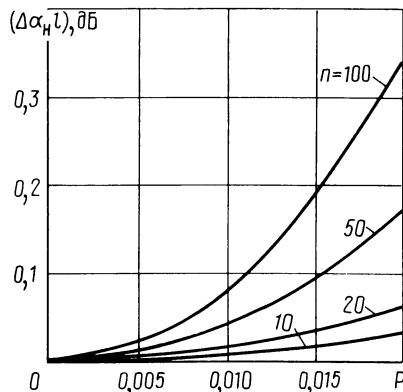


Рис. 3.12. Добавки затухания кабеля в зависимости от значения и числа случайных нерегулярностей при $W=0,9$ и $\alpha l=5$ дБ

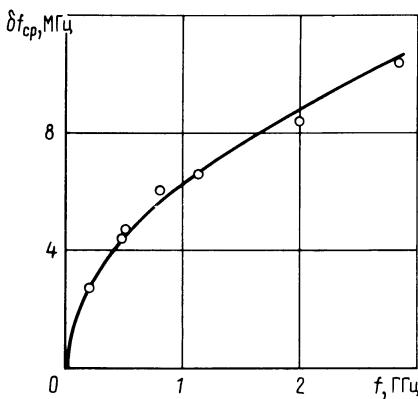


Рис. 3.13. Средние интервалы между соседними выбросами коэффициента отражения в зависимости от частоты для кабеля РК 75-4-11

ногого затухания линии за счет переотражения волн на случайных неоднородностях, которое с учетом приведенных соображений имеет вид

$$\Delta \alpha_h L = 8,7 \frac{1,95 p_i^{-2}}{(1 - e^{-4\alpha\lambda})^{0,5}} \left[\frac{2L}{\lambda} + \frac{1 - e^{-4\alpha L}}{e^{-4\alpha\lambda} - 1} \right]^{0,5}. \quad (3.44)$$

Это выражение выведено для $\Delta \alpha_h L$, которое не превысит данного значения с вероятностью 0,9. Расчетные значения $\Delta \alpha_h L$ показаны на рис. 3.12.

Представляет интерес оценка интервалов между выбросами на частотной характеристике коэффициента отражения кабелей со случайными нерегулярностями. Минимальное значение δf определяется длиной кабе-

ля aL , если $aL < 5$ дБ:

$$\delta f_{\min} \approx c/2L\xi,$$

где c – скорость света.

Для кабеля большой длины (с суммарным затуханием больше 5 дБ)

$$\delta f_{\text{ср}} \approx ca/2g\xi,$$

где a – коэффициент затухания, дБ/м; g – коэффициент, зависящий от конструкции кабеля и равный 3,5–6 дБ.

Типичная зависимость $\delta f_{\text{ср}}$ от f показана на рис. 3.13.

3.5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЯРНОЙ ЛИНИИ МЕТОДОМ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Ступенчатые модели нерегулярной линии позволяют использовать современные методы для расчетов частотных характеристик конкретного образца кабеля, ориентированные на применение компьютера. В предыдущих параграфах приведены формулы, позволяющие производить оценки максимальных значений коэффициента отражения, неравномерности частотных характеристик коэффициента передачи (АЧХ и ФЧХ), и определены общие закономерности поведения. На практике очень часто оказывается необходимым выполнить расчеты частотных характеристик нерегулярной линии с известным волновым сопротивлением по длине. Использование алгоритма, приведенного в § 3.1, имеет смысл только при значительных изменениях волнового сопротивления по длине и практически приемлемо для ограниченного числа разбиений. Общие выражения, приведенные в § 3.2–3.4, также требуют слишком большого объема вычислений.

Как показали исследования, чрезвычайно большой эффект с точки зрения ускорения расчетов дает применение алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) [24, 25].

Пусть в линии распространяется волна единичной амплитуды с нулевой начальной фазой, тогда волны отражения образуют попутный поток, который в первом приближении складывается из парных переотражений от всех пар нерегулярностей:

$$U_{\text{п.п.}} = e^{-\gamma L} (\rho_1 \rho_0 e^{-2\gamma l} + \rho_2 \rho_0 e^{-4\gamma l} + \rho_3 \rho_0 e^{-6\gamma l} + \dots \\ \dots + \rho_2 \rho_1 e^{-2\gamma l} + \rho_3 \rho_1 e^{-4\gamma l} + \dots + \rho_3 \rho_2 e^{-2\gamma l} + \dots),$$

где L – длина линии; l – длина участка разбиения;

$$\rho_i = (Z_{i+1} - Z_i)/(Z_{i+1} + Z_i);$$

γ – коэффициент распространения, постоянный вдоль линии.

Группируя в этом выражении члены с одинаковыми показателями степени, получим

$$U_{\text{пп}} = -e^{-\gamma l} [(\rho_0\rho_1 + \rho_1\rho_2 + \rho_2\rho_3 + \dots)e^{-2\gamma l} + (\rho_0\rho_2 + \rho_2\rho_4 + \rho_4\rho_6 + \dots)e^{-4\gamma l} + (\rho_0\rho_3 + \rho_1\rho_4 + \rho_2\rho_5 + \dots)e^{-6\gamma l} + \dots]$$

или

$$U_{\text{пп}} = e^{-\gamma L} \sum_{m=0}^{N-1} R_m e^{-2\gamma lm};$$

$$R_m = \begin{cases} -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \rho_n^2 & \text{при } m = 0; \\ -\sum_{n=0}^{N-m-1} \rho_n \rho_{n+m} & \text{при } m = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases}$$

Входящая в выражение для попутного потока сумма представляет собой Z -преобразование (при $Z = e^{-2\gamma l}$) [24] последовательности R_m , являющейся ненормированной и определенной для всех возможных сдвигов автокорреляционной функцией последовательности ρ_i , взятой с обратным знаком (нулевой член уменьшен вдвое).

Волна, прошедшая через линию, складывается из основной волны и попутного потока: $U_{\text{пп}} = e^{-\gamma L} + U_{\text{пп}}$ при условии, что $U_0 = 1$.

Тогда для $U_{\text{пп}}$, или коэффициента передачи линии, можно записать:

$$U_{\text{пп}} = K_U = e^{-\gamma L} \sum_{m=0}^{N-1} R_{1m} e^{-2\gamma lm}; \quad (3.45)$$

$$R_{1m} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \Gamma_n^2 & \text{при } m = 0; \\ -\sum_{n=0}^{N-m-1} \Gamma_n \Gamma_{n+m} & \text{при } m = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases}$$

Учитывая, что $U_{\text{обр}}$, или входной коэффициент отражения линии, в первом приближении

$$U_{\text{обр}} = \Gamma_{\text{вх}} = \sum_{n=0}^{N-1} \rho_n e^{-2\gamma l_n}$$

также является Z -преобразованием, можно сделать следующий важный вывод.

Если пренебречь переотражениями третьего порядка и выше, то для ступенчатых моделей нерегулярностей входной коэффициент отражения, попутный поток и коэффициент передачи выражаются через Z -преобразование (при $Z = e^{-2\gamma l}$) последовательности коэффициентов отражения по длине линии и автокорреляционной функции этой последовательности (с измененным нулевым членом) соответственно. Это позволяет использовать для вычисления указанных параметров одни и те же алгоритмы и программы, в частности, основанные на методе БПФ.

Для непрерывной модели нерегулярностей с распределенным по длине коэффициентом отражения $\Gamma(x) = \frac{1}{2Z} \frac{dZ(x)}{dx}$, если пренебречь высшими переотражениями, получаются аналогичные выражения:

для входного коэффициента отражения

$$U_{\text{обр}} = \frac{1}{2Z} \int_0^L \frac{dZ}{dx} e^{-2\gamma x} dx;$$

для попутного потока

$$U_{\text{п.п.}} = e^{-\gamma L} \int_0^L R(y) e^{-2\gamma y} dy;$$

$$R(y) = -\frac{1}{4Z^2} \int_y^{L-y} \frac{dZ(x)}{dx} \frac{dZ(x+y)}{dx} dx;$$

для коэффициента передачи

$$U_{\text{пр}} = K_U = e^{-\gamma L} \int_0^L R_1(y) e^{-2\gamma y} dy; \quad (3.46)$$

$$R_1(y) = \begin{cases} \delta(y) & \text{при } y = 0; \\ R(y) & \text{при } 0 < y \leq L, \end{cases}$$

где y — расстояние между точками переотражения волн.

В этих выражениях участвуют непрерывные аналоги Z -преобразования коэффициента отражения по длине линии или его автокорреляционной функции. Так, выражение для коэффициента передачи линии с синусоидальной нерегулярностью можно получить, подставляя в (3.46) автом-

корреляционную функцию, равную для этого случая

$$R(y) = -\rho_0^2 \theta^2 \left(\frac{L-y}{2} \cos \theta y - \frac{1}{2\theta} \sin \theta y \right),$$

где $\theta = 2\pi/l$ (l – длина периода нерегулярности).

Физический смысл функций R и R_1 проясняется, если учесть, что при $a = 0$, $Z = e^{-i2\beta l}$ Z -преобразование переходит в преобразование Фурье, а преобразованием Фурье связаны между собой коэффициент передачи линии и ее импульсная характеристика. Таким образом, функция R_1 представляет собой импульсную характеристику линии при нулевом затухании, а R – добавку к импульсной характеристике регулярной линии без потерь (дельта-функции) от нерегулярностей.

Представление характеристик линии с нерегулярностями через Z -преобразование (3.45), (3.46) позволяет использовать для расчета быстрые алгоритмы, основанные на методе БПФ. Общим ограничением в этом случае, кроме малости местных коэффициентов отражения, является линейность собственной (без учета нерегулярностей) фазочастотной характеристики линии, $\beta \sim f$ в диапазоне частот, в котором производится расчет.

Наиболее быстрый и простой алгоритм применен для случая частотно-независимого затухания. Тогда Z -преобразование сводится к преобразованию Фурье [24]

$$\Phi_k(F_n) = \sum_{n=0}^{M-1} (F_n e^{-2\alpha l n}) e^{-i \frac{2\pi k n}{M}}, \quad (3.47)$$

где F_n – последовательность, подлежащая преобразованию (ρ_n , R_n или $R_{1,n}$ в зависимости от того, какая характеристика вычисляется); $\pi k/M = \beta l$.

Это M -точечное дискретное преобразование Фурье дает значения исключной характеристики на M частотах при $k = 0, 1, \dots, M-1$.

При этом частоты $f(k) = ck/2M\xi l$, где c – скорость света; ξ – коэффициент укорочения; l – длина элементарного участка линии; M – число частот; $M \geq N$, где N – число нерегулярностей.

Для использования метода БПФ требуется обычно, чтобы $M = 2^m$, где $m = 1, 2, \dots$ – основание БПФ, поэтому последовательность F_n при $N < 2^m$ дополняется нулями до ближайшего 2^m . Это преобразование дает $M/2 + 1$ независимых значений вычисляемой характеристики. Наивысшая частота, до которой преобразование является однозначным:

$$f_N = c/4\xi l.$$

На длину волны, соответствующую этой частоте, приходятся четыре отсчета исходной последовательности.

Разрешение по частоте можно повысить в 2, 4, 8 и т.д. раз, если использовать большие значения m . Время вычислений при этом растет как $M \log_2 M$. Использование метода БПФ дает значительный выигрыш во времени по сравнению с непосредственным вычислением по формулам (3.45), (3.46). Так, для $N = M = 512$ выигрыш во времени составляет $N^2/N \log_2 N = 57$ раз, при $N = 1024$ скорость вычислений возрастает в 102 раза.

Кроме ограничений, связанных с постоянством затухания, неудобствами при использовании такого алгоритма является постоянный интервал частот и шаг по частоте, жестко связанный с шагом дискретизации $\Gamma(x)$.

Эти ограничения, так же как и постоянство затухания, снимаются при использовании для расчета Z -преобразования метода линейной частотно-модулированной (ЛЧМ) фильтрации [24, 25]. Метод ЛЧМ-фильтрации представляет собой эффективный алгоритм вычисления Z -преобразования вдоль контура на комплексной плоскости вида $Z_k = AW^{-k}$, $k = 0, 1, \dots, M - 1$, где A и W – произвольные комплексные числа; M – произвольное целое число. Коэффициент Z_k представляет собой спираль на комплексной плоскости, в отличие от окружности, на которой производится преобразование Фурье. Использование ЛЧМ-фильтрации позволяет произвольно задавать начальную и конечную частоты диапазона, в котором производится расчет (в пределах f_N), и шаг по частоте. Кроме того, затухание, как и фаза, предполагается в заданном диапазоне частот, изменяющимися линейно. Задаваясь значениями $f_1, \alpha_1(f_1), f_2, \alpha_2(f_2), M$, зная $f_N = c/4\xi l$ и учитывая, что при f_N сдвиг фазы на длине l равен $\pi/2$, можно вычислить параметры преобразования:

$$A = e^{2\alpha_1 l - i\pi \frac{f_1}{f_N}} ; \quad (3.48)$$

$$W = e^{-2(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{l}{M-1} + i\pi \frac{(f_2 - f_1)}{f_N(M-1)}}, \quad (3.49)$$

Алгоритм быстрой ЛЧМ-фильтрации [24] основан на теореме о свертке двух последовательностей и включает в себя два прямых и одно обратное БПФ. По сравнению с непосредственным использованием БПФ алгоритм быстрой ЛЧМ-фильтрации работает в три-четыре раза медленнее, однако при $M > 100$ в десятки раз быстрее непосредственного вычисления БПФ или матричных методов. Значительным преимуществом ЛЧМ-фильтрации является произвольный выбор диапазона и шага по частоте.

Вычисление автокорреляционных функций, используемых в формулах для коэффициента передачи и попутного потока, непосредственно по соответствующим формулам неэффективно и сводит на нет преимущества быстрых методов в дальнейших расчетах. Поэтому для автокор-

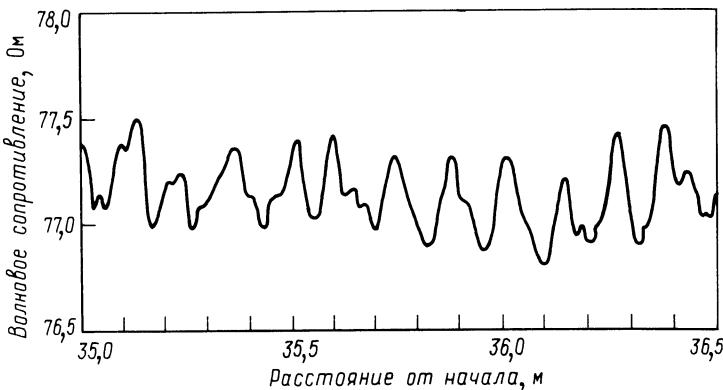


Рис. 3.14. Участок временной рефлектомограммы образца

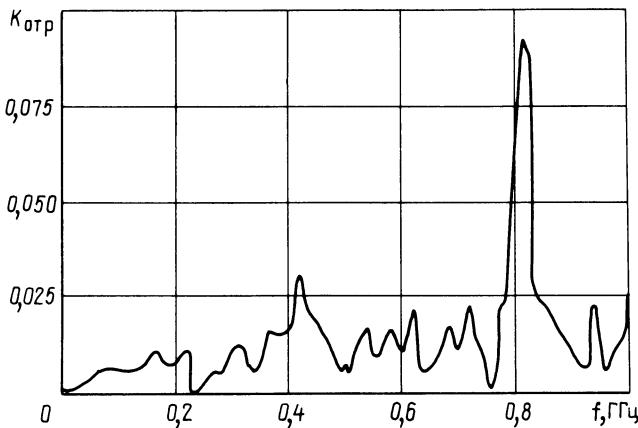


Рис. 3.15. Рассчитанная зависимость модуля входного коэффициента отражения образца по участку временной рефлектомограммы. (Расчет проводился на ПЭВМ ДВК-2 методом быстрой ЛЧМ-фильтрации.)

реляционных функций удобно использовать быстрый алгоритм [25], заключающийся в прямом БПФ исходной последовательности, дополненной нулями до 2^m , возведении результата в квадрат почленно, и обратном быстром преобразовании Фурье. Получаемая таким образом автокорреляционная функция R_m не нуждается в дальнейшей коррекции и после модификации нулевого члена используется непосредственно для расчета коэффициента передачи или попутного потока.

Рассчитанный таким образом коэффициент передачи линии может быть использован для нахождения с использованием БПФ импульсной

и переходной характеристик линии и расчета формы передаваемых сигналов, а попутный поток – для нахождения добавок к соответствующим характеристикам от нерегулярности линии.

Использование описанных эффективных алгоритмов в системах автоматического контроля при производстве кабеля позволяет в ходе изготавления прогнозировать частотные характеристики и оперативно выявлять элементы кабеля и технологическое оборудование, ответственные за появление пиков коэффициента отражения и затухания, превышающих допустимые пределы.

Описанные алгоритмы реализованы на ЭВМ ДВК-2 и "Электроника-60" и показали хорошие результаты.

На рис. 3.14 приведен участок временной рефлекограммы образца радиочастотного кабеля, с которой снимались отсчеты Z_i , на рис. 3.15 – частотная зависимость $\Gamma_{\text{вх}}$, рассчитанная методом быстрой ЛЧМ-фильтрации.

3.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Параметры, характеризующие передачу электромагнитной энергии по линии конкретной конструкции, зависят от структуры электромагнитного поля в линии. Для коаксиального кабеля обычно рассматривают поле в идеальной конструкции (т.е. проводники круглые расположены строго коаксиально) без учета потерь энергии в проводниках, а затем отдельно учитывают потери в проводниках [1, 21].

Представляется более удобным получить параметры коаксиального кабеля сразу с учетом потерь в проводниках [26]. Положим, что пространство между проводниками заполнено однородным диэлектриком, который характеризуется диэлектрической проницаемостью ϵ_a . Картина распределения электрического и магнитного полей коаксиального кабеля показана на рис. 3.16. Линии магнитного поля имеют вид концентрических окружностей, а электрическое поле E_r направлено по радиусу. Продольные составляющие электрического поля E_Z у внутреннего и внешнего проводников имеют противоположные направления.

Электромагнитное поле коаксиального кабеля определяется следующей системой уравнений (полная система уравнений приведена, например, в [1, 21]):

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} = (\sigma + i\omega\epsilon_a)E_Z; \quad (3.50)$$

$$-\frac{\partial H_\varphi}{\partial Z} = (\sigma + i\omega\epsilon_a)E_r; \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial Z} - \frac{\partial E_Z}{\partial r} = i\omega\mu_a H_\varphi, \quad (3.52)$$

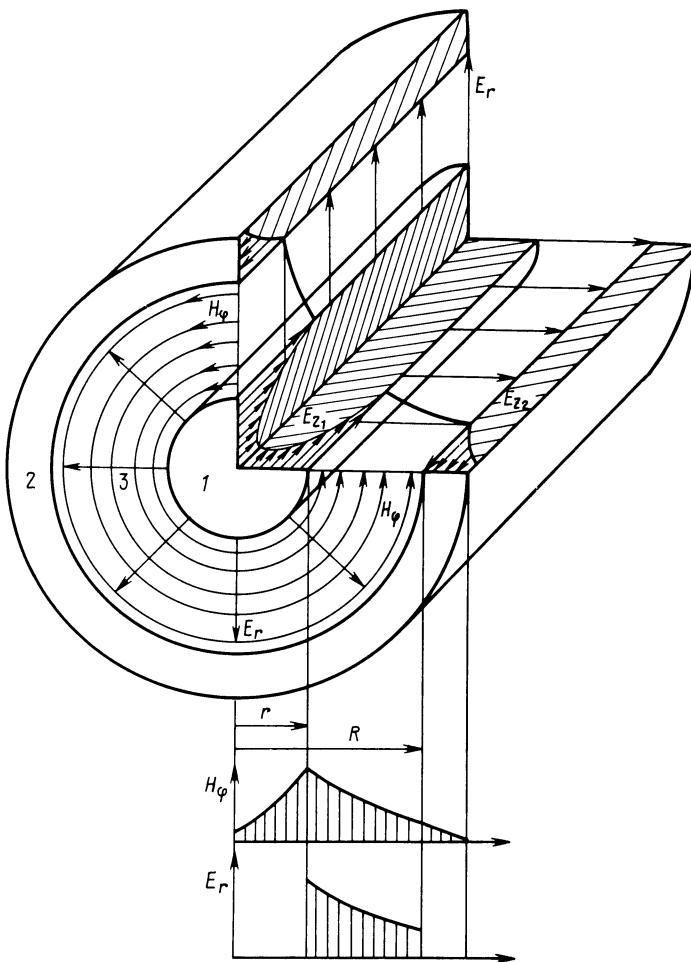


Рис. 3.16. Структура электрических и магнитных полей в коаксиальном кабеле

где σ — проводимость среды; ϵ_a — диэлектрическая проницаемость; μ_a — магнитная проницаемость; ω — круговая частота.

Удобно рассматривать отдельно поле во внутреннем проводнике — область 1, внешнем — 2 и в изоляции — 3 (см. рис. 3.16).

Так как в проводниках составляющая $E_r = 0$, то для проводников (области 1 и 2) получают

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} = (\sigma + i\omega\epsilon_a)E_Z; \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial E_Z}{\partial Z} = i\omega\mu_a H_\varphi, \quad (3.54)$$

откуда после дифференцирования и разделения переменных

$$\frac{\partial^2 E_Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_Z}{\partial r} - k^2 E_Z = 0, \quad (3.55)$$

где $k = \sqrt{i\omega\mu_a(\sigma + i\omega\epsilon_a)}$ – коэффициент распространения волны в проводнике.

Положим, что в кабеле существует только падающая волна

$$A = A_0 e^{-\gamma Z}.$$

Для пространства между проводниками (область 3) с учетом, что

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial Z} = -\gamma H_\varphi; \quad \frac{\partial E_r}{\partial Z} = -\gamma E_r; \quad \frac{\partial E_r}{\partial Z} = -\gamma E_Z,$$

т.е. составляющие электрического и магнитного полей изменяются по экспоненциальному закону с коэффициентом γ , получим

$$\frac{\partial E_Z}{\partial r} = H_\varphi \left(i\omega\mu_a - \frac{\gamma^2}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \right); \quad (3.56)$$

$$\gamma H_\varphi = (\sigma + i\omega\epsilon_a) E_r. \quad (3.57)$$

Границные условия на поверхностях проводников зададим в виде

$$Z_{n1} = \frac{E_Z(r_1)}{H_\varphi(r_1)}; \quad Z_{n2} = \frac{E_Z(r_2)}{H_\varphi(r_2)}, \quad (3.58)$$

где $Z_{n1} = R_{n1} + iX_{n1}$; $Z_{n2} = R_{n2} + iX_{n2}$ – поверхностный импеданс соответственно внутреннего и внешнего проводников. Так как внутри проводников $E_r = 0$, то в проводниках распространяются цилиндрические волны, направленные внутрь проводников по нормали к их поверхности. В пространстве между проводниками распространяется почти (так как существует $E_Z \neq 0$) плоская волна.

Решение задачи о передаче волн по коаксиальному кабелю сводится к установлению связи между величинами, введенными в теории линий с распределенными параметрами, и величинами, характеризующими электромагнитное поле в кабеле.

В телеграфных уравнениях (см. § 3.1)

$$\gamma = \sqrt{ZY}; \quad Z_B = \frac{U_{\text{пад}}}{I_{\text{пад}}} = \sqrt{\frac{Z}{Y}},$$

следовательно, $Z = \gamma Z_B$; $Y = \gamma/Z_B$.

Из закона полного тока следует, что $\oint H_\varphi d\varphi = I$, в однородном поле $H_\varphi = I/2\pi r$.

Для напряжения между проводниками

$$\begin{aligned} U &= \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{\gamma}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \int_{r_1}^{r_2} \frac{I}{2\pi r} dr = \\ &= \frac{\gamma}{(\sigma + i\omega\epsilon_a)} \frac{I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \end{aligned}$$

Следовательно, волновое сопротивление коаксиального кабеля

$$Z_B = \frac{U}{I} = \frac{\gamma}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3.59)$$

Из уравнения (3.56) с учетом закона полного тока

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_Z}{\partial r} &= \frac{I}{2\pi r} \left(i\omega\mu_a - \frac{\gamma^2}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \right); \\ E_Z &= \int \frac{I}{2\pi r} \left(i\omega\mu_a - \frac{\gamma^2}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \right) dr + C = \\ &= \frac{I}{2\pi} \left(i\omega\mu_a + \frac{\gamma^2}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \right) \ln r + C. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Используя граничные условия

$$E_Z(r_1) = Z_{\Pi 1} H_\varphi(r_1) = Z_{\Pi 1} \frac{I}{2\pi r_1};$$

$$E_Z(r_2) = Z_{\Pi 2} H_\varphi(r_2) = -Z_{\Pi 2} \frac{I}{2\pi r_2}$$

и исключив постоянную C и ток I , получим

$$\gamma = \sqrt{i\omega\mu_a(\sigma + i\omega\epsilon_a) + \frac{\sigma + i\omega\epsilon_a}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \left(\frac{Z_{\Pi 1}}{r_1} + \frac{Z_{\Pi 2}}{r_2} \right)}. \quad (3.61)$$

Соответственно

$$Y = G + i\omega C = \frac{\gamma}{Z_B} = \frac{(\sigma + i\omega\epsilon_a) 2\pi}{\ln r_2/r_1}; \quad (3.62)$$

$$Z = R + i\omega L = \gamma Z_B = \gamma^2 \frac{1}{\sigma + i\omega\epsilon_a} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{i\omega\mu_a}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{Z_{\pi 1}}{2\pi r_1} + \frac{Z_{\pi 2}}{2\pi r_2}. \quad (3.63)$$

Из уравнения (3.60) следует, что E_z существует во всем пространстве между проводниками, меняясь от $E_z(r_1)$ до $E_z(r_2)$, следовательно, вектор напряженности электрического поля $\underline{E} = \underline{E}_r + \underline{E}_z$ образует поверхность вращения, близкую к конической, а не плоскость.

Обозначив $\operatorname{tg}\delta_3 = \sigma/\omega\epsilon_a$; $\mu_a = \mu_3\mu_0$; $\epsilon_a = \epsilon_3\epsilon_0$, где $\epsilon_0 = 1 \cdot 10^{-9}/36\pi \Phi/\text{м}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; ϵ_3 ; μ_3 – эквивалентные значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей (которые получены за счет усреднения свойств изоляции по объему), получим согласно (3.10), выделив вещественную и мнимую части в (3.61):

коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \frac{1}{\ln r_2/r_1} \left(\frac{R_{\pi 1}}{r_1} + \frac{R_{\pi 2}}{r_2} \right) + \frac{1}{2} \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} \operatorname{tg}\delta_3; \quad (3.64)$$

коэффициент фазы

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} \left(1 + \frac{\operatorname{tg}\delta_3^2}{2} \right) \left(1 + \frac{1}{\omega \mu_a \ln \frac{r_2}{r_1}} \right) \times \\ \times \left[\left(\frac{X_{\pi 1}}{r_1} + \frac{X_{\pi 2}}{r_2} \right) + \frac{1}{2} \frac{1}{\omega \mu_a \ln r_2/r_1} \left(\frac{R_{\pi 1}}{r_1} + \frac{R_{\pi 2}}{r_2} \right) \right]^2; \quad (3.65)$$

сопротивление

$$R = R_1 + R_2 = \frac{R_{\pi 1}}{2\pi r_1} + \frac{R_{\pi 2}}{2\pi r_2}; \quad (3.66)$$

индуктивность

$$L = \frac{\mu_a}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\omega} \left(\frac{X_{\pi 1}}{2\pi r_1} + \frac{X_{\pi 2}}{2\pi r_2} \right); \quad (3.67)$$

емкость

$$C = \frac{2\pi\epsilon_a}{\ln r_2/r_1}; \quad (3.68)$$

проводимость

$$G = \frac{2\pi\omega\epsilon_a \operatorname{tg} \delta}{\ln r_2/r_1} = \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (3.69)$$

Волновое сопротивление можно записать в виде

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \times \\ \times \ln \frac{r_2}{r_1} \left[1 + \frac{1}{\omega\mu} \frac{\frac{X_{\Pi 1}}{r_1} + \frac{X_{\Pi 2}}{r_2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]. \quad (3.70)$$

На высоких частотах обычно $R \ll \omega L$, $G \ll \omega C$, тогда

$$Z_B \approx \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_3}} \ln \frac{r_2}{r_1}; \quad (3.71)$$

$$\alpha \approx \frac{1}{2Z_B} \left(\frac{R_{\Pi 1}}{2\pi r_1} + \frac{R_{\Pi 2}}{2\pi r_2} \right) + \frac{1}{2} \omega \sqrt{\epsilon_3 \epsilon_0 \mu_0 \mu_3} \operatorname{tg} \delta_3; \quad (3.72)$$

$$\beta \approx \omega \sqrt{\epsilon_3 \epsilon_0 \mu_3 \mu_0}. \quad (3.73)$$

Заметим, что $R_{\Pi}/2\pi r$; $X_{\Pi}/2\pi r$ есть активная и реактивная составляющие высокочастотного сопротивления проводника радиуса r .

3.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИММЕТРИЧНЫХ КАБЕЛЕЙ

Наряду с коаксиальными кабелями, составляющими большинство радиочастотных кабелей, применяются и симметричные кабели. На рис. 3.17 показаны возможные варианты симметричных кабелей и структура электрических и магнитных полей в них.

Как видно из рисунков, структура поля в симметричном кабеле, каждый проводник которого заключен в отдельный экран (рис. 3.17, а), не отличается от поля в коаксиальном кабеле. В симметричном кабеле, заключенном в общий экран (рис. 3.17, б), электрические и магнитные поля весьма близки к полю симметричного кабеля с отдельными экранами. В кабелях с общим экраном, далеко отстоящим от проводников, и в кабелях без экрана (рис. 3.17, в, г) поле существенно отлично от поля в коаксиальном кабеле.

Предположим, что возбуждающее напряжение приложено к внутренним проводникам симметричного кабеля с отдельными экранами, а экраны заземлены. В этом случае в каждом отдельном коаксиальном ка-

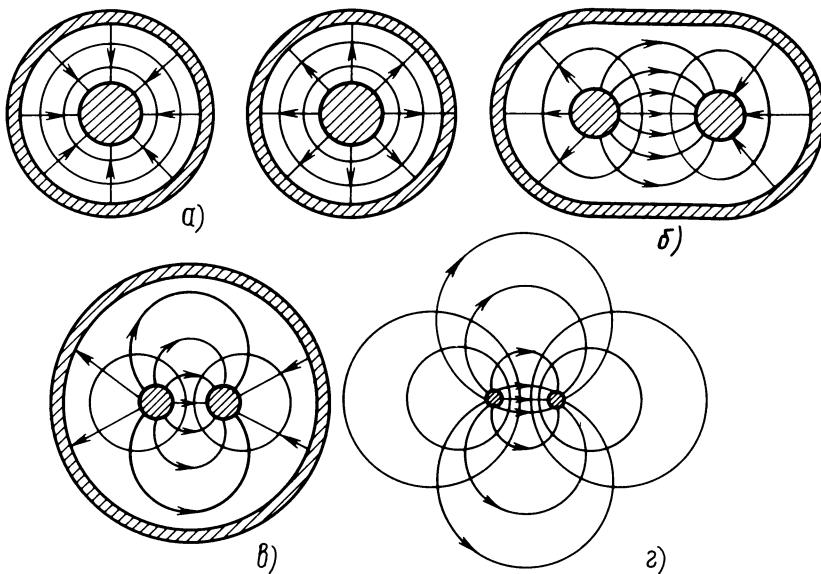


Рис. 3.17. Структура электрических и магнитных полей в симметричных кабелях

беле будут возбуждаться электромагнитные волны с напряжением на входе $\underline{U}_{01} = \underline{U}_0/2$, где \underline{U}_{01} – напряжение между проводником и экраном кабеля.

Волновое сопротивление симметричного кабеля с проводниками в отдельных экранах Z'_B равно удвоенному значению волнового сопротивления Z_B отдельного кабеля, т.е. $Z'_B = 2Z_B$, где Z_B определяется согласно (3.70).

Коэффициент затухания α' и фазы β' симметричного кабеля равны коэффициентам затухания и фазы отдельного коаксиального кабеля [см. (3.72), (3.73)]. Сопротивление и индуктивность равны удвоенным значениям, а проводимость и емкость – половинам этих параметров отдельного кабеля [см. (3.66) – (3.69)]: $\alpha' = \alpha$, $\beta' = \beta$, $R' = 2R$, $L' = 2L$, $G' = G/2$, $C' = C/2$.

Следует отметить, что указанные соотношения справедливы только для случая, когда оба отдельных коаксиала абсолютно одинаковы. Если же коэффициенты фазы отдельных коаксиалов не равны, то на выходе такого симметричного кабеля придут волны с напряжениями, не совпадающими по фазе, а частотная характеристика коэффициента передачи окажется неравномерной. При этом максимумы коэффициента передачи будут чередоваться с минимумами с интервалом по частоте $\Delta\omega$ тем меньшим, чем больше разница между коэффициентами фазы

и чем больше длина кабеля, определяемым из условия

$$(\beta_1 - \beta_2)l = k\pi,$$

где β_1, β_2 – коэффициенты фазы отдельных коаксиалов; l – длина кабеля; k – целое число 1, 2, 3. . . .

На высоких частотах

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{(\sqrt{\epsilon_{31}\epsilon_0\mu_1\mu_0} - \sqrt{\epsilon_{32}\epsilon_0\mu_2\mu_0})l},$$

где $\epsilon_{31}, \mu_1, \epsilon_{32}, \mu_2$ – относительная эквивалентная диэлектрическая проницаемость и относительная магнитная проницаемость изоляции отдельных коаксиалов.

Несколько иная картина имеет место в симметричном кабеле, заключенном в общий экран. В этом случае условие разделения передаваемой мощности на два потока неприемлемо, так как оба канала сильно связаны между собой. Напряженность магнитного поля H_φ на поверхностях проводников и экрана – непостоянна. Степень непостоянства напряженности поля зависит от размеров проводников и расстояния между ними, размеров и формы экрана.

Подробное и точное решение задачи определения параметров симметричной линии, особенно для случая, когда глубина проникновения поля в проводники соизмерима с их поперечными размерами, представляет серьезные математические трудности (см. [1]). Приведем только основные расчетные формулы для первичных и вторичных параметров.

Сопротивление симметричной линии

$$R = 2R_0 \left[1 + F\left(\frac{kd}{2}\right) + \frac{G\left(\frac{kd}{2}\right)\left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 + H\left(\frac{kd}{2}\right)\left(\frac{d}{a_1}\right)^2} \right], \quad (3.74)$$

где R_0 – сопротивление одного провода постоянному току, Ом/м; $\frac{kd}{2} = \frac{d}{2} \sqrt{\omega\mu_a\sigma}$; d – диаметр проводников, м; a_1 – расстояние между центрами проводников, м; σ – проводимость проводников, 1/Ом·м.

Значения функций $F(kd/2)$, $G(kd/2)$, $H(kd/2)$, $Q(kd/2)$ приведены в табл. 3.2 (более подробные таблицы см. в [42]).

Для частот выше 1 МГц данная формула может быть упрощена и выражена через поверхностное сопротивление

$$R = \frac{2R_n}{\pi d} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{a_1} \right)^2 \right],$$

где R_n – поверхностное сопротивление проводника, Ом.

**Таблица 3.2. Значения функций $F(kd/2)$, $G(kd/2)$, $H(kd/2)$,
 $Q(kd/2)$, учитывающих влияние вихревых токов
и эффекта близости**

$\frac{kd}{2}$	$F\left(\frac{kd}{2}\right)$	$G\left(\frac{kd}{2}\right)$	$H\left(\frac{kd}{2}\right)$	$Q\left(\frac{kd}{2}\right)$
0	0	0	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	$\frac{\sqrt{2} \frac{kd}{2} - 3}{4}$	$\frac{\sqrt{2} \frac{kd}{2} - 1}{8}$	$\frac{1}{4} \left[\frac{3\sqrt{2} \frac{kd}{2} - 5}{\sqrt{2} \frac{kd}{2} - 1} - \frac{2\sqrt{2}}{\frac{kd}{2}} \right] \frac{2\sqrt{2}}{\frac{kd}{2}}$	

Индуктивность симметричной линии складывается из межпроводниковой и внутрипроводниковой индуктивностей [1]

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2a_1 - d}{d} \right) + \frac{\mu}{2} \cdot 10^{-7} Q \left(\frac{kd}{2} \right); \quad (3.75)$$

емкость

$$C = \frac{\frac{2\pi\epsilon_3\epsilon_0}{2a_1 - d}}{2 \ln \frac{2a_1 - d}{d}} = \frac{\epsilon_3 10^{-9}}{36 \ln \frac{2a_1 - d}{d}}; \quad (3.76)$$

проводимость

$$G = \omega C t g \delta.$$

Волновое сопротивление и коэффициент затухания симметричной линии могут быть получены из первичных параметров. Для высокочастотного приближения волновое сопротивление

$$Z_B = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_3}} \ln \frac{2a_1 - d}{d}; \quad (3.77)$$

коэффициент затухания

$$\alpha = \left(\frac{R}{2Z_B} + \frac{1}{2} \omega \sqrt{\epsilon_3 \epsilon_0 \mu \mu_0} \operatorname{tg} \delta_3 \right) 8,689. \quad (3.78)$$

При высоких частотах симметричная линия будет излучать некоторое количество энергии в пространство, что приведет к дополнительному увеличению коэффициента затухания. Для прямолинейной симметричной линии (без изгибов)

$$\Delta\alpha \approx \frac{800}{Z_B} \left(\frac{a_1}{\lambda} \right)^2,$$

где λ — длина волны.

Электромагнитное поле открытой симметричной линии простирается на значительное расстояние. По этой причине на ее параметры оказывают влияние окружающие предметы. Кроме того, открытая симметрическая линия подвержена влиянию внешних электромагнитных полей. По этим причинам на радиочастотах применяют экранирование симметрических линий (см. рис. 3.17, а–в). Наличие экрана вокруг симметрической линии изменяет ее электромагнитное поле. В экране возбуждаются токи, которые, в свою очередь, изменяют токи, текущие по проводникам.

Уровни результирующего поля и потерь энергии в проводниках и экране существенно зависят от расстояния между проводниками и диаметра экрана. Активное сопротивление экранированного кабеля (рис. 3.17, в)

$$R_3 = R_{H3} + R_{n.3} - R_{p.3},$$

где R_{H3} — сопротивление незакранированной симметрической линии; $R_{n.3}$ — дополнительное сопротивление за счет потерь в экране; $R_{p.3}$ — снижение сопротивления проводников кабеля за счет перераспределения тока из-за реакции экрана,

$$R_3 = 2R_0 \left[1 + F \left(\frac{kd}{2} \right) + \frac{G \left(\frac{kd}{2} \right) \left(\frac{d}{a_1} \right)^2}{1 - H \left(\frac{kd}{2} \right) \left(\frac{d}{a_1} \right)} \times \right. \\ \left. \times \left(1 - 4 \frac{r_3^2 \left(\frac{a_1}{2} \right)^2}{r_3^4 - \left(\frac{a_1}{2} \right)^4} \right) + R_{n.3} \right], \quad (3.79)$$

где r_3 — радиус экрана.

Для частот, при которых $0 < kt < 0,5$,

$$R_{\text{п.э.}} = 8R_{0\vartheta} \left(\frac{a_1}{2r_3} \right)^2 \left(\frac{k^4 r_3^2 t^2}{k^2 r_3^2 t^2 + 4} \right) ,$$

где t — толщина экрана; $R_{0\vartheta} = \rho_\vartheta / 2\pi r_3 t$ — сопротивление экрана постоянному току.

Для частот при $kt \geq 3$ имеем

$$R_{\text{п.э.}} = 8R_{0\vartheta} t \frac{\sqrt{\omega\mu}}{2\rho_\vartheta} \frac{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 r_3^2}{r_3^4 - \left(\frac{a_1}{2}\right)^4} .$$

На высоких частотах при $kt > 10$ и

$$R_\vartheta = \frac{2R_\Pi}{\pi d} + \frac{R_\Pi}{\pi d} \left(\frac{d}{a_1} \right)^2 \left(1 - 4 \frac{(ra_1/2)^2}{r_3^4 - (a_1/2)^4} \right) + \\ + 4R_{\text{п.э.}} \frac{r_3 (a_1/2)^2}{r_3^4 (a_1/2)^4} ,$$

где $R_\Pi, R_{\text{п.э.}}$ — поверхностные сопротивления проводников и экрана.

Индуктивность симметричного экранированного кабеля

$$L_\vartheta = \left[4 \ln \frac{a_1}{d} \left(\frac{r_3^2 - a_1^2}{r_3^2 + a_1^2} \right) + \mu Q \times \right. \\ \left. \times \left(k \frac{d}{2} - 8 \frac{\sqrt{2}\mu_\vartheta}{kc} \left(\frac{r_3^2 a_1^2}{r_3^4 - a_1^2} \right) \right) \right] 10^{-7}. \quad (3.80)$$

На высоких частотах

$$L_\vartheta = 0,92 \cdot 10^{-6} \lg \left[\frac{2a_1}{d} \frac{(2r_3)^2 - a_1^2}{(2r_3)^2 + a_1^2} \right] .$$

Емкость

$$C_\vartheta = \frac{\epsilon_1 10^{-9}}{36 \ln \left(\frac{2a_1}{d} \frac{(2r_3)^2 - a_1^2}{(2r_3)^2 + a_1^2} \right)} . \quad (3.81)$$

Волновое сопротивление экранированного кабеля при $d/2r_3 < 0,2$

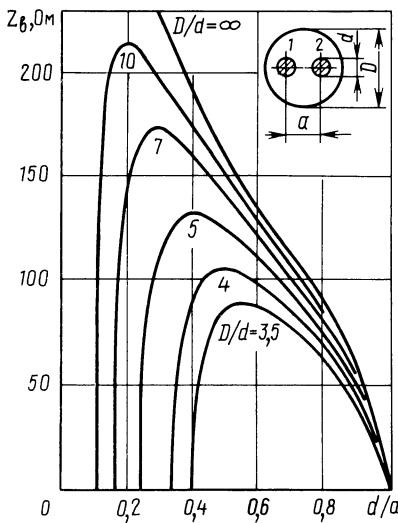


Рис. 3.18. Зависимость волнового сопротивления симметричной линии в экране от размеров

может быть рассчитано по формуле

$$Z_{B3} = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_3}} \operatorname{Arch} \left[\frac{a_1}{d} \frac{(2r_3)^2 - (a_1^2 - d^2)}{(2r_3)^2 + (a_1^2 - d^2)} \right]. \quad (3.82)$$

Для случая, когда $d/2r_3 < 0,25$ и $\frac{a_1}{d} < \left(1 - \frac{d}{r_3} \right)$

$$Z_{B3} = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_3}} \ln \left[\frac{2a_1}{d} \frac{(2r_3)^2 - a_1^2}{(2r_3)^2 + a_1^2} \right]. \quad (3.83)$$

На рис. 3.18 приведена зависимость волнового сопротивления симметричного экранированного кабеля от размеров проводников и экрана. Коэффициент затухания симметричного кабеля в экране может быть выражен через R_3 , Z_{B3} и G_3 исходя из основной формулы (3.10).

3.8. ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛОШНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Как показано в § 3.6, электромагнитное поле внутри проводников содержит только продольную составляющую электрического поля E_Z и тангенциальную составляющую магнитного поля H_φ и описывается уравнением (3.55). Определение высокочастотного сопротивления через поверхностное сопротивление проводника, т.е. через отношение E_Z/H_φ на поверхности проводника, сводится к нахождению решения данного уравнения, которое известно и имеет вид

$$E_Z = A I_0(\sqrt{i}kr) + B K_0(\sqrt{i}kr),$$

где $I_0(\sqrt{i}kr)$, $K_0(\sqrt{i}kr)$ — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка.

Используя уравнение (3.54), получим

$$H_\varphi = \frac{1}{i \omega \mu} \frac{\partial E_Z}{\partial r} = \frac{1}{i \omega \mu} \left[A I'_0(\sqrt{i} kr) + B K'_0(\sqrt{i} kr) \right];$$

так как

$$I'_0(\sqrt{i} kr) = I_1(\sqrt{i} kr); \quad K'_0(\sqrt{i} kr) = -K_1(\sqrt{i} kr),$$

то

$$H_\varphi = \frac{1}{i \omega \mu} [A I_1(\sqrt{i} kr) - B K_1(\sqrt{i} kr)].$$

Свойства функций Бесселя первого I_0, I_1 и второго K_0, K_1 рода нулевого и первого порядков хорошо изучены и решения для H_φ и E_Z известны. Из них можно получить значения поверхностного сопротивления круглых проводников из сплошного однородного металла (см. § 3.10).

Для круглого сплошного проводника, в котором поперечная волна распространяется от поверхности к центру,

$$Z_\Pi = \sqrt{i \omega \mu_a / \sigma} \frac{I_0(\sqrt{i} kr_1)}{I_1(\sqrt{i} kr_1)}. \quad (3.84)$$

Здесь $k = \sqrt{\omega \mu \sigma}$ [см. (3.55)], так как в металле $\sigma \gg \omega \epsilon_a$; r_1 радиус внутреннего проводника.

Для внешнего проводника в виде трубы

$$\begin{aligned} Z_\Pi &= \sqrt{i \omega \mu_a / \sigma} \frac{I_0(\sqrt{i} kr_2) K_1(\sqrt{i} kr_B) +}{I_1(\sqrt{i} kr_B) K_1(\sqrt{i} kr_2)} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ K_0(\sqrt{i} kr_2) I_1(\sqrt{i} kr_B)}{- K_1(\sqrt{i} kr_B) I_1(\sqrt{i} kr_2)}, \end{aligned} \quad (3.85)$$

где r_2 — радиус поверхности стенки, обращенной к электромагнитному полю — внутренний радиус внешнего проводника; r_B — радиус поверхности стенки дальней к полю (наружный радиус внешнего проводника).

Используя выражения для E_Z и H_φ в многослойных проводниках [1, 27], можно получить значения поверхностного сопротивления и для этих случаев.

На практике для радиочастотных кабелей можно ограничиться некоторыми упрощениями, а именно: многослойные проводники, которые нашли применение в коаксиальных радиочастотных кабелях, состоят обычно из двух-трех слоев, толщина которых Δ много меньше радиуса самого проводника. Имеется в виду серебряное, оловянное или никелевое покрытие проводников, служащее для защиты от коррозии. В этом случае уравнения для напряженности электрического поля цилин-

дрической волны (3.55) при больших r вырождаются в уравнения для плоской волны

$$\frac{\partial^2 E_Z}{\partial r^2} = -k^2 E_Z; \quad \frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial r^2} = -k^2 H_\varphi,$$

которые полностью совпадают по виду с уравнениями (3.3), (3.4) для напряжения и тока в линии передачи. Это позволяет использовать все выражения, полученные в § 3.1, в предположении, что:

волновое сопротивление среды

$$Z_c = \sqrt{\frac{i \omega \mu_a}{\sigma + i \omega \epsilon_a}};$$

коэффициент распространения в среде

$$k_c = \sqrt{i \omega \mu_a (\sigma + i \omega \epsilon_a)}.$$

Для хороших проводников, какими являются все металлы, $\sigma \gg \omega \epsilon$, поэтому

$$k = \sqrt{i \omega \mu_a \sigma} = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu_a \sigma}{2}}, \quad (3.86)$$

т.е. для металлов мнимая и действительные части коэффициента распространения равны, следовательно, уже на глубине

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}} \quad (3.87)$$

электромагнитное поле затухает в e раз. Эту величину называют *глубиной проникновения*. Если толщина стенки проводника $\Delta \gg \delta$, то такой проводник является аналогом бесконечно длинной линии. Входное сопротивление линии — для проводника поверхностное сопротивление. Волновое сопротивление линии — для проводников волновое сопротивление среды

$$Z_\Pi = Z_c = \sqrt{\frac{i \omega \mu_a}{\sigma}} = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2 \sigma}}. \quad (3.88)$$

Заметим, если $Z_\Pi = R_\Pi + i X_\Pi$, то

$$R_\Pi = 1/\sigma \delta,$$

т.е. поверхностное сопротивление проводника на частоте ω равно сопротивлению слоя металла толщиной δ на постоянном токе и не зависит от толщины самого проводника.

Для проводника малой толщины, когда $\delta \sim \Delta$, по аналогии с (3.19)

$$Z_{\pi} = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \operatorname{cth}(k\Delta). \quad (3.89)$$

Алгоритм для расчета поверхностного сопротивления многослойного проводника, состоящего из слоев с любыми физическими параметрами, совпадает с расчетом входного сопротивления составной линии и приведен в § 3.1:

$$Z_{\pi i} = Z_{ci} \frac{Z_{ci+1} + Z_{ci} \operatorname{tanh} k_i \Delta_i}{Z_{ci} + Z_{ci+1} \operatorname{tanh} k_i \Delta_i}, \quad (3.90)$$

где i изменяется от n до 0; k_i, Z_{ci}, Δ_i – коэффициент распространения,

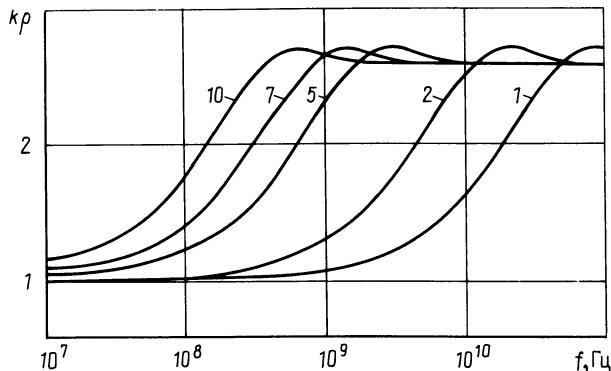


Рис. 3.19. Зависимость коэффициента K_{ρ} от частоты для медной проволоки, покрытой оловом. (Цифры около кривых показывают толщину покрытия в микрометрах.)

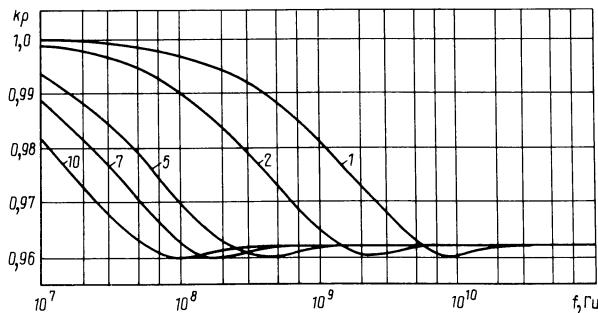


Рис. 3.20. Зависимость коэффициента K_{ρ} от частоты для медной посеребренной проволоки. (Цифры около кривых показывают толщину покрытия в микрометрах.)

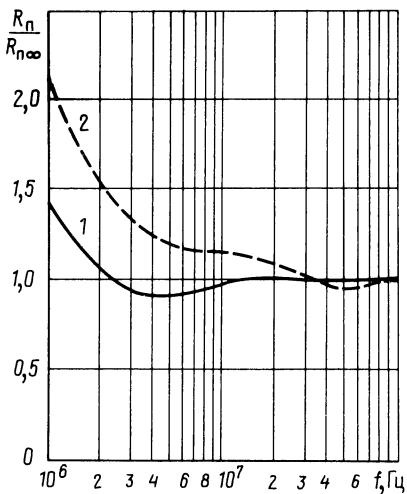


Рис. 3.21. Поверхностное сопротивление тонкостенного алюминиевого проводника толщиной 60 мкм (1) и трехслойного проводника алюминий 20 мкм + лавсан 20 мкм + алюминий 20 мкм (2), отнесенное к поверхностному сопротивлению толстостенного проводника

ром, отнесенные к поверхностному сопротивлению и выраженные через коэффициент k_p .

На рис. 3.21 показано расчетное поверхностное сопротивление тонкостенного алюминиевого проводника, отнесенное к поверхностному сопротивлению толстостенного $\Delta \gg \delta$ алюминиевого проводника и поверхностное сопротивление трехслойного проводника, состоящего из слоя алюминиевой фольги, слоя лавсана и еще одного слоя алюминиевой фольги, отнесенное к сопротивлению толстостенного алюминиевого проводника.

Аномальный скин-эффект. *Предельный аномальный скин-эффект.* Кроме поперечных размеров проводников на поверхностное сопротивление на высоких частотах влияет соотношение глубины проникновения поля и длины свободного пробега электронов.

При охлаждении до низких (криогенных) температур чистые металлы значительно увеличивают свою проводимость. Так, чистые медь и алюминий при температурах менее 20 К имеют в 100–1000 раз большую проводимость, чем при нормальной температуре. Это происходит за счет уменьшения тепловых колебаний кристаллической решетки металла и увеличения длины свободного пробега электронов. При низких температурах возможна ситуация, при которой длина свободного пробега электронов проводимости l намного превосходит глубину проникновения δ . В этом случае электроны, скорости которых направлены под большими углами к поверхности, быстро "вылетают" из скин-слоя и в дальнейшем не участвуют в проводимости – становятся неэффективными. Лишь электроны, "скользящие" вдоль поверхности, вносят заметный вклад в проводимость. Но и они движутся в поле, которое сильно изменяет свои амплитуду и фазу по всей длине пробега. Закон Ома $j = \sigma E$ оказывается неприменим.

волновое сопротивление среды и толщина i -го слоя; Z_{po} будет исключенным поверхностным сопротивлением многослойного проводника.

На рис. 3.19 и 3.20 показаны расчетные значения поверхностного сопротивления проводников с тонкими покрытиями оловом и серебром,

Поверхностное сопротивление при $l \gg \delta$ не зависит от проводимости и отлично от поверхностного сопротивления при нормальных температурах. Это явление называют аномальным скин-эффектом. В этом предельном случае поверхностное сопротивление [28]

$$Z_{\text{п}\infty} = (1 + \sqrt{3}i) \left(\frac{\sqrt{3}}{4} \pi f^2 \mu_a^2 \frac{l}{\sigma} \right)^{1/3}, \quad (3.91)$$

где $Z_{\text{п}\infty}$ означает, что $l/\delta \rightarrow \infty$ (формула выведена в предположении, что электроны отражаются от поверхности металла диффузно).

Заметим, что отношение l/σ — величина постоянная для каждого конкретного металла, не зависящая от температуры. Действительно,

$$\sigma = \frac{2}{3} \frac{e^2 l S_F}{(2\pi\hbar)^3}; \quad \frac{l}{\sigma} = \frac{3}{2} \frac{(2\pi\hbar)^3}{e^2 S_F} = \text{const},$$

где e — заряд электрона; \hbar — постоянная Планка; S_F — площадь поверхности Ферми.

Как видно из формулы (3.91), при аномальном скин-эффекте поверхностное сопротивление пропорционально $f^{2/3}$, а не $f^{1/2}$, как в классическом случае. Мнимая часть сопротивления в $\sqrt{3}$ раз больше действительной.

Промежуточная область. Если длина свободного пробега l одного порядка с δ , то поведение проводников занимает промежуточную область между классическим и аномальным скин-эффектом. В этой области определяющим параметром является отношение

$$a = \frac{3}{2} \left(\frac{l}{\delta} \right)^2 = \frac{3}{2} \pi \mu \left(\frac{l}{\rho^3} \right)^2 \frac{f}{\rho^3} = A \frac{f}{\rho^3}, \quad (3.92)$$

где $\rho = 1/\sigma$ — удельное сопротивление постоянному току.

Для $a^{1/6} \geq 1,2$ поверхностное сопротивление рассчитывается по формулам

$$R_{\text{п}} = R_{\text{п}\infty} F_R(a) = R_{\text{п}\infty} (1 + 1,157a^{-0,2757}); \quad (3.93)$$

$$X_{\text{п}} = X_{\text{п}\infty} F_X(a) = X_{\text{п}\infty} (1 + 0,473a^{-0,2757}). \quad (3.94)$$

Для $0,5 \leq a^{1/6} < 1,2$ с помощью линейной интерполяции получено выражение [26]

$$R_{\text{п}} = \sqrt{\pi f \mu \rho} [1 + 0,1(a^{1/6} - 0,5)]. \quad (3.95)$$

При $a^{1/6} < 0,5$ справедливы классические формулы.

Формула (3.93) может быть представлена в обобщенном виде:

$$R_{\text{п}} = B f^{2/3} F_R(a); \quad B = \left(\frac{\sqrt{3}}{4} \pi \mu^2 \frac{l}{\sigma} \right)^{1/3}.$$

Таблица 3.3. Значения коэффициентов A , B и C для расчетов в области аномального скин-эффекта

Металл	$\frac{l}{\sigma} \cdot 10^{-16}$ Ом·м	$A \cdot 10^{-36}$	$B \cdot 10^{-9}$	C^*
Алюминий	4,81	1,43	1,02	256
Медь	6,49	2,5	1,32	233
Олово	10,5	6,37	1,32	198
Свинец	10,6	6,7	1,32	198
Серебро	11,6	8,06	1,36	192
Золото	11,9	8,41	1,37	191
Кадмий	17,5	18,3	1,56	167

* C – сомножитель из формулы (3.96).

Значения отношения l / σ , множителей A и B для различных металлов приведены в табл. 3.3, а зависимость $F_R(a)$ представлена на рис. 3.22.

При охлаждении проводников до криогенных температур в результате увеличения их проводимости значение поверхностного сопротивления уменьшается (рис. 3.23) и при некоторой температуре достигает своего минимального значения. Дальнейшее снижение температуры уже не может привести к уменьшению сопротивления.

Представляет интерес оценка предельных возможностей снижения поверхностного сопротивления проводников путем охлаждения их до кри-

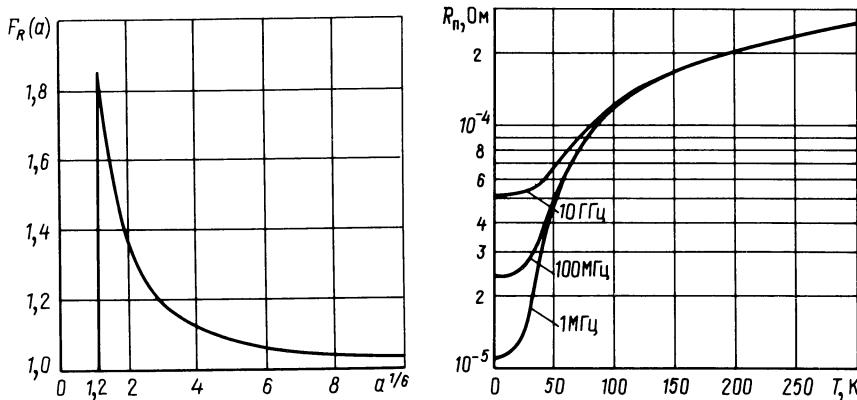
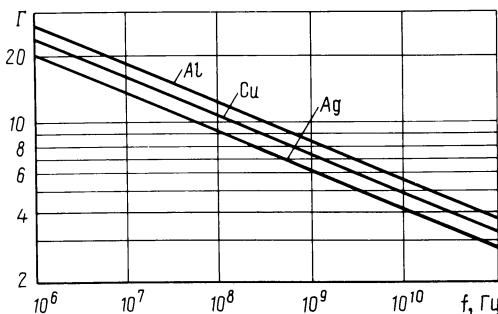


Рис. 3.22. Множитель $F_R(a)$ для расчетов поверхностного сопротивления

Рис. 3.23. Поверхностное сопротивление меди в зависимости от температуры и частоты

Рис. 3.24. Предельно возможное снижение поверхностного сопротивления металлов путем охлаждения до криогенных температур



огенных температур по отношению, например, к поверхностному сопротивлению стандартной меди при нормальной температуре (20°C).

Удельное электрическое сопротивление меди при 20°C $\rho_{\text{Cu}}(20^\circ\text{C}) = 1,724 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Тогда из (3.88) и (3.91) получим

$$\Gamma = \frac{R_{\Pi}^{\text{Cu}}(20^\circ\text{C})}{R_{\Pi\infty}} = \frac{\sqrt{\pi f \mu \rho_{\text{Cu}}(20^\circ\text{C})}}{\left(\frac{\sqrt{3}}{4} \pi f^2 \mu^2 \frac{l}{\sigma}\right)^{1/3}} = \frac{C}{f^{1/6}} . \quad (3.96)$$

Значения C приведены в табл. 3.3, на рис. 3.24 представлены зависимости Γ от f для меди, алюминия и серебра.

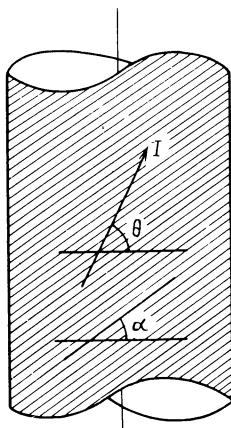
Таким образом, если известно удельное электрическое сопротивление проводников при температуре T , то по формуле для затухания (3.64) и соответствующим формулам для поверхностного сопротивления можно рассчитать частотные характеристики затухания в проводниках. Для расчетов температурных характеристик необходимо рассчитывать зависимости $\rho(T)$ (см. гл. 4).

3.9. ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Для повышения гибкости в радиочастотных кабелях применяют многопроволочные внутренние проводники и внешние проводники в виде оплетки. Приведенные в [1, 2] экспериментальные данные и предложенные теоретические методы определения их высокочастотного сопротивления основаны на предположении о распространении тока по спирально скрученным проволокам. Как показали исследования, такая модель неверно отражает реальную картину, особенно на СВЧ.

При распространении тока под углом, не равным углу скрутки проволок внешнего повивала, ток проходит через контакты между проволоками и их сопротивление увеличивает полное сопротивление многопроволочного проводника. Для определения полного сопротивления

Рис. 3.25. Общий вид многопроволочного внутреннего проводника радиочастотного коаксиального кабеля



многопроволочного проводника в общем случае, при распространении тока под произвольным углом θ к его поперечному сечению (рис. 3.25), получена формула

$$Z_M = Z_0 K_F (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta) + j 2\pi f \eta \times \\ \times 10^{-7} \operatorname{ctg}^2 \theta + \frac{Z'_K a}{\pi (d - d_{pp}) d_{pp}} \left[\frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin \theta} \right]^2 , \quad (3.97)$$

где Z_M — полное сопротивление многопроволочного проводника при частотах, когда поверхностный эффект сильно выражен, Ом/м; $Z_0 = \frac{2\sqrt{\rho f 10^7}}{d}$ — полное сопротивление однопроволочного провод-

ника при частотах, когда поверхностный эффект сильно выражен, Ом/м; f — частота, Гц; ρ — удельное объемное сопротивление материала однопроволочного и проволок многопроволочного проводника, Ом·м; d — диаметр однопроволочного проводника, равный наружному диаметру многопроволочного проводника, м; K_F — коэффициент формы многопроволочного проводника; θ — угол распространения тока, град; α — угол скрутки, град; $\eta = \frac{n^2 + n}{(2n + 1)^2}$ — коэффициент, учитывающий площадь промежутков между проволоками в поперечном сечении многопроволочного проводника (n — число повивов в многопроволочном проводнике); Z'_K — полное сопротивление одиночного контактного перехода между проволоками внешнего повива, Ом; a — расстояние между одиночными контактными переходами, м; d_{pp} — диаметр проволок внешнего повива многопроволочного проводника, м.

Первый член формулы (3.97) учитывает увеличение сопротивления многопроволочного проводника по сравнению с сопротивлением однопроволочного проводника равного диаметра из-за неравномерного распределения плотности тока по поперечному сечению проволок, увеличения пути тока и полного сопротивления проволок, вызываемого продольным магнитным полем. Второй член формулы характеризует обусловленное продольным магнитным полем индуктивное сопротивление многопроволочного проводника, а третий — полное сопротивление контактных переходов между проволоками внешнего повива.

Коэффициент формы K_{Φ} многопроволочного проводника в первом члене формулы (3.97) учитывает увеличение полного сопротивления многопроволочного проводника за счет неравномерного распределения плотности тока по поперечному сечению проволок вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости:

$$K_{\Phi} \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{N+3}{3N} \right)^2 + 0,06 \frac{3(N-1)^2}{N(N+3)}, \quad (3.98)$$

где N – число проволок во внешнем повиве многопроволочного проводника.

Расчетные значения коэффициента формы по формуле (3.98) для семипроволочных и девятнадцатипроволочных проводников составляют соответственно 1,32 и 1,15. При увеличении числа проволок во внешнем повиве коэффициент формы согласно [31] и формуле (3.98) уменьшается и стремится к единице.

Согласно [29, 30] сопротивление контактных переходов не может быть ниже сопротивления контактирующих проволок и не может превышать емкостного сопротивления между проволоками.

Поскольку направление распространения тока, т.е. угол θ , соответствует минимуму полного сопротивления, то в общем случае ток в многопроволочном проводнике распространяется под углом, который больше угла скрутки проволок внешнего повива, но меньше $\pi/2$ и проходит через контакты между проволоками. Сопротивление контактных переходов является случайной величиной [29, 30], определенной в некотором интервале значений, что обуславливает вероятностный характер сопротивления многопроволочных проводников. Авторами установлено, что наиболее вероятное значение полного сопротивления одиночного контактного перехода между проволоками внешнего повива проводника определяется формулой

$$Z'_k = \frac{\rho}{2b} (f/f_0), \quad (3.99)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление материала контактирующих проволок, Ом·м; b – размер участка контакта (контактной площадки), м; f – частота, Гц; $f_0 = 10^6$ Гц.

С учетом формулы (3.99) полное сопротивление контактных переходов в формуле (3.97) примет следующий вид:

$$\frac{Z'_k(a)}{\pi(d - d_{np})d_{np}} \left[\frac{\sin(\theta - \alpha_c)}{\sin \theta} \right]^2 = \frac{m \frac{\rho}{2} (f/f_0)}{\pi(d - d_{np})d_{np}} \left[\frac{\sin(\theta - \alpha_c)}{\sin \theta} \right]^2, \quad (3.100)$$

где $m = a/b$ – отношение расстояния между участками контакта к размеру контактной площадки.

Отношение активных сопротивлений многопроволочного и однопроволочного проводников

$$k_a = \frac{R_M}{R_0} = \frac{\frac{K_\Phi^2 \sqrt{\rho f} 10^{-7}}{d} (1 + 2 \operatorname{ctg}^2 \theta) +}{\frac{m \frac{\rho}{2} (f/f_0)}{\pi (d - d_{pp}) d_{pp}} \left[\frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin \theta} \right]^2} \rightarrow \frac{\frac{2 \sqrt{\rho f} 10^{-7}}{d}}{\frac{m \frac{\rho}{2} (f/f_0)}{\pi (d - d_{pp}) d_{pp}} \left[\frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin \theta} \right]^2}, \quad (3.101)$$

где k_a – коэффициент активного сопротивления многопроволочного проводника; R_M и R_0 – активные сопротивления многопроволочного и однопроволочного проводников равных диаметров.

В формулах (3.100) и (3.101) параметр m характеризует число металлических участков контакта, а произведение $m\rho/2$ – удельное объемное сопротивление условно непрерывного металлического контакта между проволоками внешнего повива многопроволочного проводника. Экспериментальные данные показывают, что для проводников из посеребренных проволок $m = 2 \div 2,2$, а из медных и луженых проволок $m = 16 \div 20$.

Для расчета активного сопротивления многопроволочных проводников необходимо определить направление распространения тока в многопроволочном проводнике, т.е. угол θ , при котором полное сопротивление многопроволочного проводника по формуле (3.97) минимально.

Найденное значение угла θ подставляют в (3.101) и вычисляют коэффициент увеличения активного сопротивления многопроволочного проводника k_{a_1} .

На рис. 3.26 представлены расчетные и экспериментально полученные частотные зависимости коэффициента активного сопротивления девятнадцатипроволочных проводников из посеребренных и медных проволок с углами скрутки проволок внешнего повива 65 и 80° . Активное сопротивление многопроволочного проводника увеличивается с увеличением частоты более сильно, чем сопротивление однопроволочного проводника. Коэффициент активного сопротивления многопроволочного проводника из посеребренных проволок при частотах $10^9 \div 2 \cdot 10^{10}$ Гц в $1,5 \div 2$ раза меньше, чем у аналогичного проводника из медных проволок. Уменьшение угла скрутки проволок внешнего повива приводит к значительному увеличению коэффициента активного сопротивления. При увеличении угла скрутки до $\pi/2$, т.е. при продольном расположении проволок, коэффициент активного сопротивления уменьшается и становится равным коэффициенту формы K_Φ . На рис. 3.27 показано влияние угла

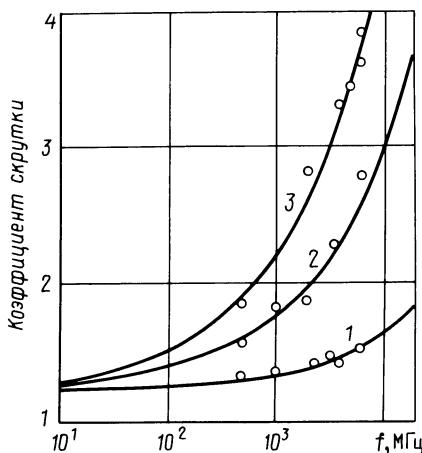


Рис. 3.26. Частотные зависимости коэффициента скрутки девятнадцатипроволочных проводников из посеребренных и медных проволок диаметром 0,32 мм:

— расчетные значения; ○ — экспериментальные значения; 1 — посеребренные проволоки марки БМС, угол скрутки 80° ; 2 — медные проволоки, угол скрутки 80° ; 3 — посеребренные проволоки марки БМС, угол скрутки 65°

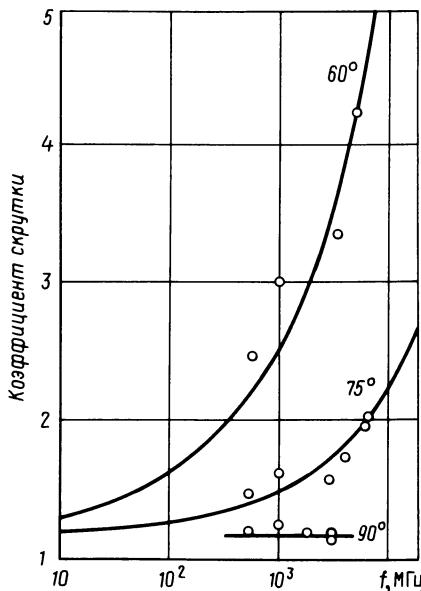


Рис. 3.27. Частотные зависимости коэффициента скрутки девятнадцатипроволочных проводников из медных посеребренных проволок марки БМС диаметром 0,5 мм с углом скрутки 90° , 75° , 60° :

— расчетные значения; ○ — экспериментальные значения

скрутки проволок внешнего повива на коэффициент активного сопротивления многопроволочного проводника.

Увеличение числа проволок в многопроволочном проводнике при сохранении диаметра проводника приводит к уменьшению коэффициента формы и к увеличению числа контактов на пути тока. В связи с этим при частотах до 10^9 Гц коэффициент активного сопротивления девятнадцатипроволочного проводника ниже, чем у семипроволочного. При более высоких частотах коэффициент активного сопротивления девятнадцатипроволочного проводника выше, чем у семипроволочного. На рис. 3.28 показаны частотные зависимости коэффициента скрутки семипроволочных проводников из медных проволок различных диаметров. С увеличением диаметра проводника согласно (3.97) увеличиваются угол распространения тока, число контактов на пути тока и их влияние на активное сопротивление многопроволочного проводника. В связи с этим коэффициент активного сопротивления проводников малых

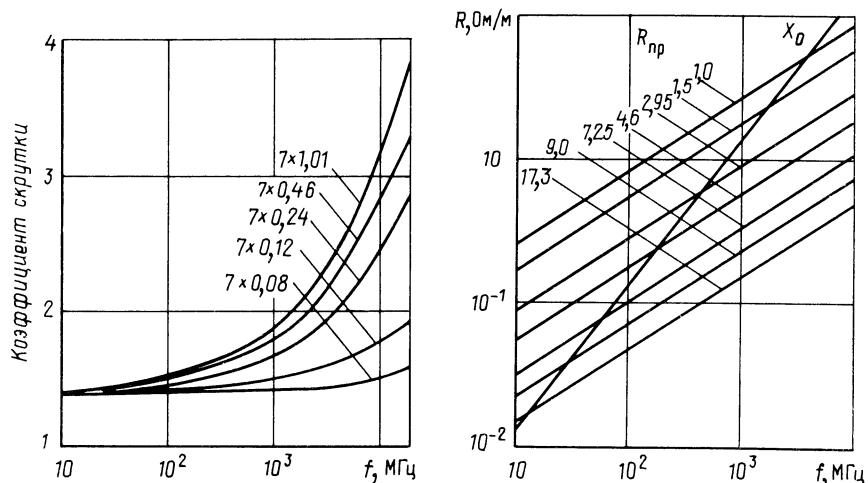


Рис. 3.28. Частотные зависимости коэффициента скрутки семипроволочных проводников с углом скрутки 80° из медных проволок различных диаметров

Рис. 3.29. Частотные зависимости активного сопротивления проволок и индуктивного сопротивления оплетки. (Цифры около кривых указывают диаметр по изоляции.)

диаметров $7 \times 0,08$ и $7 \times 0,12$ значительно меньше зависит от частоты и покрытия проволок серебром, чем у проводников более крупных диаметров.

Высокочастотное сопротивление оплеток. Для определения высокочастотного сопротивления оплеток радиочастотных кабелей на основе выражений, приведенных в [2], предложена следующая формула, которая наглядно показывает связь увеличения активного сопротивления с плотностью и углом оплетки:

$$k_{a2} = \frac{R_{\text{опл}}}{R_T} = \frac{1}{\Pi_{\text{пов}} \sin \alpha}, \quad (3.102)$$

где k_{a2} – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления оплетки по сравнению с трубкой равных размеров; $R_{\text{опл}}$ – активное сопротивление оплетки, Ом/м; $R_T = 2\sqrt{\rho \cdot 10^{-7}} / d_2$ – активное сопротивление трубы на высоких частотах, Ом/м (ρ – удельное объемное сопротивление материала трубы и проволок оплетки, Ом·м; f – частота, Гц; d_2 – внутренний диаметр трубы, мм); $\Pi_{\text{пов}}$ – поверхностная плотность оплетки, отн. ед.; α – угол оплетки, град.

Формула (3.102) не полно характеризует повышенное активное сопротивление оплетки по сравнению с трубкой. Анализ поля оплетки на основе теоретических положений [31] показывает, что при распростра-

нении тока по проволокам оплетки возбуждаются локальные нескомпенсированные магнитные поля, связанные с токами в проволоках, которые обуславливают увеличение индуктивного сопротивления оплетки и тем самым повышают ее полное сопротивление. На рис. 3.29 показаны частотные зависимости активного сопротивления проволок оплеток кабелей с различными диаметрами по изоляции и индуктивного сопротивления, обусловленного локальными магнитными полями. Как видно из рисунка, индуктивное сопротивление оплетки увеличивает ее полное сопротивление тем больше, чем выше частота и больше внутренний диаметр оплетки (диаметр кабеля по изоляции).

При распространении тока вдоль оплетки и через контакты между проволоками индуктивное сопротивление оплетки уменьшается, но ее полное сопротивление увеличивается за счет контактных сопротивлений. В общем случае при распространении тока под углом θ к поперечному сечению оплетки для определения ее полного сопротивления получена следующая формула:

$$Z_{\text{опл}} = \frac{Z_T}{\Pi_{\text{пов}} \sin \theta} + i 12\pi f \cdot 10^9 (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta) \left(\frac{1 - \Pi_1}{\Pi_1} \right)^2 + \\ + \frac{m_0 \rho (f/f_0)}{\pi (D + d_1) d_1} \left[\frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin \theta} \right]^2, \quad (3.103)$$

где $Z_T = (1 + i) 2\sqrt{\rho f 10^{-7}}/d_2$ — полное сопротивление трубы на высоких частотах, Ом/м; $\Pi_1 = 1 - \sqrt{1 - \Pi_{\text{пов}}}$ — линейная плотность оплетки, отн. ед.

Первый член формулы (3.103) характеризует полное сопротивление проволок оплетки, второй — индуктивное сопротивление, обусловленное локальными магнитными полями, а третий — активное сопротивление контактов между проволоками оплетки на пути тока. Все составляющие полного сопротивления оплетки зависят от угла θ , т.е. от направления распространения тока. При увеличении угла θ от α до $\pi/2$ первой и второй

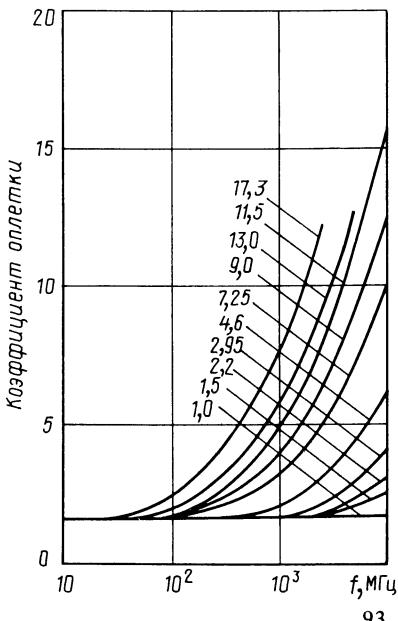


Рис. 3.30. Частотные зависимости коэффициента оплетки (рекомендуемые значения). (Цифры около кривых указывают диаметр по изоляции).

члены формулы (3.103) уменьшаются из-за уменьшения пути тока и индуктивного сопротивления, а третий член увеличивается из-за увеличения числа контактов на пути тока. В связи с этим минимум полного сопротивления оплетки, как и минимум полного сопротивления многопроводочного проводника, соответствует углу распространения тока θ , значения которого больше α , но меньше $\pi/2$.

Учитывая характерные значения сопротивления контактов между проволоками и определяя направление распространения тока по минимуму полного сопротивления, получаем частотные зависимости коэффициента оплетки, наиболее вероятные значения которого показаны на рис. 3.30.

3.10. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Первичные электрические параметры радиочастотного кабеля рекомендуется рассчитывать в следующей последовательности:

- 1) полные сопротивления внутреннего и внешнего проводников и кабеля в целом;
- 2) емкость, проводимость изоляции и полная поперечная проводимость кабеля.

Расчет полных сопротивлений внутреннего и внешнего проводников и кабеля в целом

Внутренний проводник однопроволочный монометаллический. В соответствии с формулами (3.63), (3.66), (3.67), (3.74), (3.84) имеем

$$Z_1 = R_1 + i\omega L_1 = \frac{K_1}{2\pi r_1} \frac{I_0(k_1 r_1)}{I_1(k_1 r_1)} = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} \sqrt{i} \frac{I_0(\sqrt{i} k_1 r_1)}{I_1(\sqrt{i} k_1 r_1)} = \\ = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} M_{a0} e^{i\varphi_{a0}} = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} [C_{a0}(k_1 r_1) + iS_{a0}(k_1 r_1)]; \quad (3.104)$$

$$C_{a0} = M_{a0} \cos \varphi_{a0}; \quad S_{a0} = M_{a0} \sin \varphi_{a0};$$

$$K_1 \approx \sqrt{i} k_1 \approx \sqrt{i} \sqrt{\omega \mu_{a1} \sigma_1},$$

где Z_1 – полное сопротивление внутреннего проводника, Ом/м; R_1 – активное высокочастотное сопротивление внутреннего проводника, Ом/м; L_1 – индуктивность внутреннего проводника, Гн/м; K_1 – коэффициент распространения волны в проводнике; k_1 – коэффициент вихревых токов материала внутреннего проводника; r_1 – радиус внутреннего проводника, м; $\sigma_1 = 1/\rho_1$ – проводимость материала внутреннего проводника, См/м; $\mu_{a1} = \mu_0 \mu_1$ – абсолютная магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м; I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя первого рода, нулевого и первого порядков; M_{a0} , φ_{a0} , C_{a0} , S_{a0} – вспомогательные функции, введенные в работе [33].

Зависимость функций C_{a0} и S_{a0} от $k_1 r_1$, т.е. от частоты и размеров, приведена на рис. 3.31.

Программная реализация алгоритмов вычисления вспомогательных функций, приведенных в [33], осуществлена в САПР радиочастотных кабелей.

В зависимости от произведения $k_1 r_1$ следует применять точные или приближенные формулы для расчетов активного сопротивления и индуктивности внутреннего проводника. Точные формулы:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} C_{a0}(k_1 r_1); \quad L_1 = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\omega \sigma_1} S_{a0}(k_1 r_1). \quad (3.105)$$

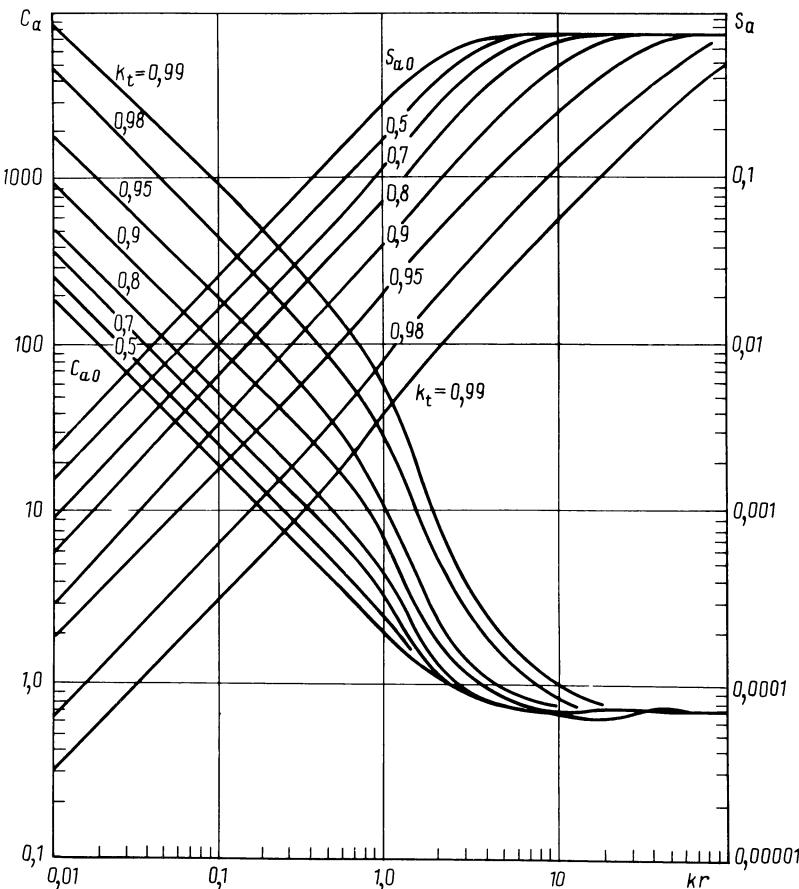


Рис. 3.31. Номограмма для определения C_{a0}, C_{at} и S_{a0}, S_{at}

Высокочастотное приближение:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2\sqrt{2}\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_1} \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_1}{\sigma_1}} ; \\ L_1 &= \frac{1}{2\sqrt{2}\pi r_1} \frac{k_1}{\omega\sigma_1} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_1} \sqrt{\frac{\mu_0\mu_1}{\omega\sigma_1}} . \end{aligned} \right\} \quad (3.106)$$

Оно справедливо, если $k_1 r_1 \geq 10$ (тогда $C_{a0} = S_{a0} = \sqrt{2}/2$).

Низкочастотное приближение:

$$R_1 = R_{01} = 1/\pi r_1^2 \sigma_1; \quad L_1 = \mu_a/8\pi = \mu_1 10^{-7}/2. \quad (3.107)$$

Оно справедливо, если $k_1 r_1 \leq 0,5$ (тогда $C_{a0} = 2/k_1 r_1$ и $S_{a0} = k_1 r_1/4$).

Таким образом, при низких частотах активное сопротивление становится равным сопротивлению проводника на постоянном токе R_{01} , а индуктивность — частотно независимой величиной.

При промежуточных частотах вычисления следует вести по точным формулам (3.105), которые могут быть представлены также через отношения между функциями Бесселя:

$$R_1 = R_{01} [1 + F(k_1 r_1)]; \quad L_1 = \frac{1}{2} \mu_1 Q(k_1 r_1) \cdot 10^{-7}, \quad (3.108)$$

где F и Q учитывают влияние поверхностного эффекта.

Сопоставляя формулы (3.105) и (3.108), получаем

$$1 + F(k_1 r_1) = \frac{k_1 r_1}{2} C_{a0}(k_1 r_1);$$

$$Q(k_1 r_1) = \frac{4}{k_1 r_1} S_{a0}(k_1 r_1).$$

Пример. Определим границы высокочастотного и низкочастотного приближений для медных проводников диаметром 0,1; 1,0 и 10 мм.

Граница высоких частот, Гц . . . $8,8 \cdot 10^7; 8,8 \cdot 10^5; 8,8 \cdot 10^3$.

Граница низких частот, Гц . . . $2,2 \cdot 10^5; 2,2 \cdot 10^3; 22$ соответственно.

Значения сопротивлений медных внутренних проводников, соответствующие граничным условиям, равны:

Диаметр проводника, мм	0,1	1	10
Высокочастотное граничное			
R_1 , Ом/м	7,8	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$
Низкочастотное граничное			
R_1 , Ом/м	2,2	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$

Из приведенных цифр видно, что для субминиатюрных и миниатюрных кабелей ($d_1 = 0,1$ и 1 мм), с одной стороны, граница высоких частот намного выше 60 кГц, которые обычно считают их нижней границей [21], а с другой стороны, при частотах до $2 - 20$ кГц влияние поверхностного эффекта еще отсутствует. Частоту 60 кГц можно принять за нижнюю границу высокочастотного диапазона только для проводников диаметром более 4 мм.

При частотах выше 200 МГц сказывается шероховатость и загрязненность поверхности проводников, что рекомендуется учитывать введением коэффициента качества поверхности $k_{\text{пов}}$:

$$R_{f_1} = R_1 k_{\text{пов}}, \quad (3.109)$$

где R_{f_1} – высокочастотное сопротивление внутреннего проводника; R_1 – высокочастотное сопротивление, определенное по одной из формул (3.105), (3.106), (3.108); $k_{\text{пов}} = 1$, если $f \leq 2 \cdot 10^8$ Гц, и $k_{\text{пов}} \approx 1,03$, если $f > 2 \cdot 10^8$ Гц.

Внутренний проводник трубчатый монометаллический описывается более сложными зависимостями, чем однопроволочный:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + i\omega L_1 = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} \frac{I_0(\sqrt{i}k_1r_1) \times}{I_1(\sqrt{i}k_1r_0) \times} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times K_1(\sqrt{i}k_1r_0) - K_0(\sqrt{i}k_1r_1) I_1(\sqrt{i}k_1r_1)}{\times K_1(\sqrt{i}k_1r_1) - K_1(\sqrt{i}k_1r_0) I_1(\sqrt{i}k_1r_1)} = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} \times \\ &\times M_{at} e^{i\varphi_{at}} = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} [C_{at}(k_1r_1r_0) + iS_{at}(k_1r_1r_0)]; \end{aligned} \quad (3.110)$$

$$C_{at} = M_{at} \cos \varphi_{at}; \quad S_{at} = M_{at} \sin \varphi_{at}; \quad r_0 = r_1 - t_1; \quad k_t = 1 - t_1/r_1,$$

где K_0 и K_1 – модифицированные функции Бесселя второго рода, нулевого и первого порядков; r_0 – внутренний радиус трубы, м; t_1 – толщина стенки трубы, м; k_t – коэффициент тонкостенности; M_{at} , φ_{at} , C_{at} , S_{at} – вспомогательные функции трубчатого внутреннего проводника, аналогичные M_{ao} , φ_{ao} , C_{ao} и S_{ao} [33].

Зависимость функций C_{at} и S_{at} от частоты, диаметра и коэффициента тонкостенности показана на рис. 3.31.

В зависимости от значений произведения k_1r_1 и k_t следует применять точные или приближенные формулы для расчета активного сопротивления и индуктивности.

Точные формулы:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\sigma_1} C_{at}(k_1r_1k_t); \quad L_1 = \frac{1}{2\pi r_1} \frac{k_1}{\omega\sigma_1} S_{at}(k_1r_1k_t). \quad (3.111)$$

Высокочастотное приближение справедливо, если $k_1 r_1 \geq 100$ и $k_t \leq 0,9$; при этом $C_{at} = S_{at} = \sqrt{2}/2$ и глубина проникновения поля много меньше толщины трубы. Формулы имеют тот же вид, что и для однопроволочного проводника (3.106).

Низкочастотное приближение:

$$R_1 = R_{01} = \frac{1}{\pi r_1^2 \sigma_1} \frac{1}{(1 - k_t^2)}. \quad (3.112)$$

Оно справедливо, если $k_1 r_1 \leq 1$ и $k_t > 0,9$ (или $k_1 r_1 \leq 0,5$ и $k_t > 0,7$), при этом $C_{at} = 2/k_1 r_1 (1 - k_t^2)$.

Внутренний проводник однопроволочный биметаллический (с защитным покрытием). Влияние металла защитного покрытия может быть учтено по формулам (3.89) и (3.90) и обычно выражается через коэффициент защитного покрытия k_ρ , равный отношению поверхностного сопротивления проводника с покрытием к поверхностному сопротивлению металла основы (обычно меди):

$$R_{f1} = R_1 k_{\text{пов}} k_\rho; \quad (3.113)$$

$$k_\rho = \frac{\sqrt{2}}{g_0} \frac{\tanh u + g_0}{1 + g_0 \tanh u} e^{i\pi/4}; \quad (3.114)$$

$$g_0 = \sqrt{\mu_1 \rho_1 / \mu_2 \rho_2}; \quad u = \sqrt{i} k_2 \Delta = \sqrt{i} \Delta \sqrt{\omega \mu_0 \mu_2 / \rho_2},$$

где Δ – толщина защитного покрытия; ρ_1 и μ_1 – удельное электрическое сопротивление и относительная магнитная проницаемость основы; ρ_2 и μ_2 – то же для защитного покрытия.

В работах [1, 2] и других публикациях приводятся графики частотной зависимости k_ρ , содержащие ошибки для толщин 5 и 7 мкм. На рис. 3.19 и 3.20 эти ошибки устранены, а также даются зависимости для покрытий толщиной 1 мкм.

Используются также *триметаллические проводники* с биметаллической основой сталь–медь. Учитывая значительную толщину медного слоя (более 0,03 мм), при расчете R_{f1} и k_ρ при частотах выше 100 МГц следует использовать те же формулы, что и для биметаллических проводников. При этом принимаем для основы свойства меди, а для защитного слоя – свойства металла покрытия. В случае использования других видов триметаллических проводников и при более низких частотах рекомендуется формула (3.90).

Скрученный внутренний проводник из монометаллических проволок имеет большее сопротивление, чем однопроволочный (см. § 3.9), что учитывается введением коэффициента увеличения потерь k_{a1} , называемого в частном случае коэффициентом скрутки:

$$R_{f1} = R_1 k_{\text{пов}} k_{a1}. \quad (3.115)$$

Значения k_{a1} зависят от контактного сопротивления, а в случае применения биметаллических и триметаллических проволок – от материала защитного покрытия. Как было показано в § 3.9, у посеребренных проводников k_{a1} меньше, чем у медных. Для луженых проволок рекомендуется применять те же значения k_{a1} , что и для медных.

Обобщенная формула высокочастотного сопротивления внутреннего проводника получена как обобщение рассмотренных выше случаев:

$$R_{f1} = R_1 k_{\text{пов}} k_{\rho} k_{a1}, \quad (3.116)$$

где R_1 – высокочастотное сопротивление монометаллического проводника, определенное по одной из формул (3.105), (3.106) или (3.111).

Внешний проводник трубчатый монометаллический является наиболее простым исполнением, для которого известно точное решение:

$$\begin{aligned} Z_2 &= R_2 + i\omega L_2 = \frac{1}{2\pi r_2} \frac{k_2}{\sigma_2} \sqrt{i} \frac{I_0(\sqrt{i}k_2r_2) \times}{I_1(\sqrt{i}k_2r_B)} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times K_1(\sqrt{i}k_2r_B) + K_0(\sqrt{i}k_2r_2) I_1(\sqrt{i}k_2r_B)}{\times K_1(\sqrt{i}k_2r_2) - K_1(\sqrt{i}k_2r_B) I_1(\sqrt{i}k_2r_2)} = \frac{1}{2\pi r_2} \frac{k_2}{\sigma_2} \times \\ &\times M_B e^{i\varphi_B} = \frac{1}{2\pi r_2} \frac{k_2}{\sigma_2} [C_B(k_2r_2k_c) + iS_B(k_2r_2k_c)]; \end{aligned} \quad (3.117)$$

$$C_B = M_B \cos \varphi_B; \quad S_B = M_B \sin \varphi_B; \quad k_2 = \sqrt{\omega\mu_{a2}\sigma_2}; \quad k_c = 1 + t_2/r_2,$$

где Z_2 – полное сопротивление внешнего проводника, R_2 – активное высокочастотное сопротивление внешнего проводника, Ом/м; L_2 – индуктивность внешнего проводника, Гн/м; k_2 – коэффициент вихревых токов материала внешнего проводника; $\mu_{a2} = \mu_0\mu_2$ – абсолютная магнитная проницаемость материала внешнего проводника, Гн/м; I_0, I_1, k_0, K_1 – функции Бесселя первого и второго рода, нулевого и первого порядков; $\sigma_2 = 1/\rho_2$ – проводимость материала внешнего проводника, См/м; M_B, φ_B, C_B и S_B – вспомогательные функции, введенные в работе [33]; r_2 – внутренний радиус внешнего проводника, м; r_B – внешний радиус внешнего проводника, м; t_2 – толщина стенки трубы, м; k_c – коэффициент тонкостенности трубы.

Зависимости функций C_B и S_B от k_2r_2 и k_c , т.е. от частоты, радиуса и толщины стенки, приведены на рис. 3.32, а программная реализация их вычислений осуществлена в САПР радиочастотных кабелей.

В зависимости от значения произведения k_2r_2 и k_c следует применять точные или приближенные формулы для расчета первичных параметров. Точные формулы:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi r_2} \frac{k_1}{\sigma_2} C_B(k_2r_2k_c); \quad L_2 = \frac{1}{2\pi r_2} \frac{k_2}{\omega\sigma_2} S_B(k_2r_2k_c). \quad (3.118)$$

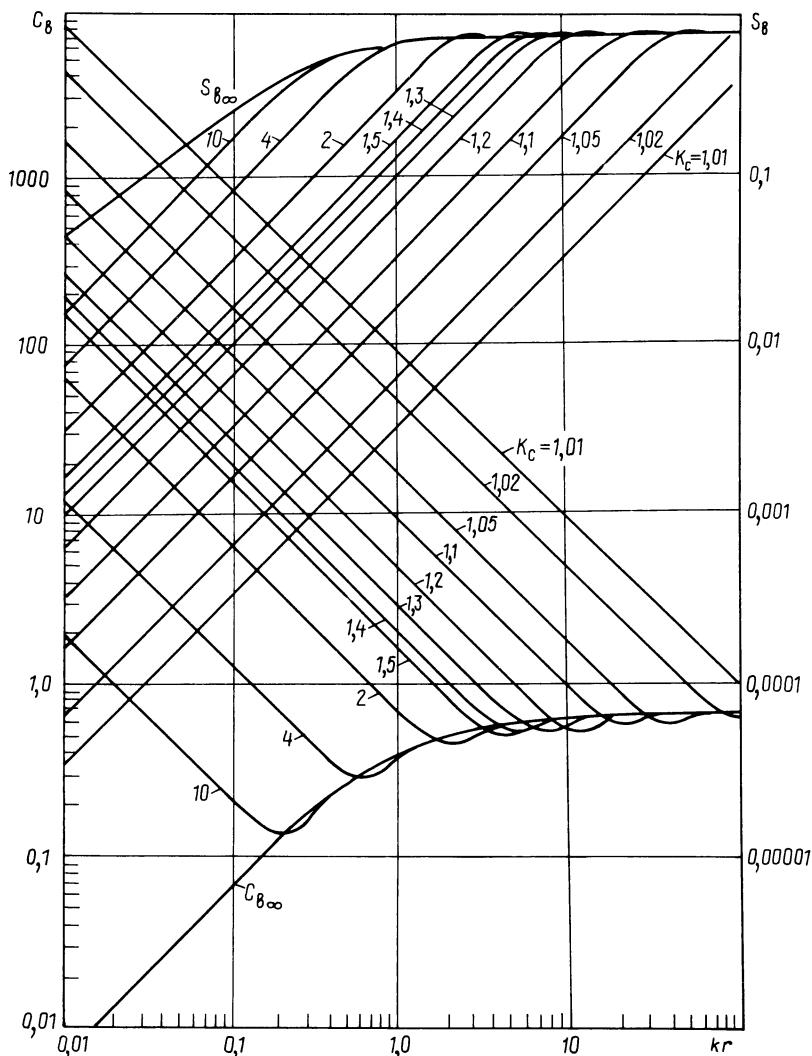


Рис. 3.32. Номограмма для определения C_B и S_B

Высокочастотное приближение:

$$R_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi r_2} \frac{k_2}{\sigma_2}; \quad L_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi r_2} \frac{k_2}{\omega\sigma_2}. \quad (3.119)$$

Оно справедливо, если $k_2 r_2 \geq 100$ и $k_c > 1,05$ (тогда $C_B = S_B = \sqrt{2}/2$).
100

Низкочастотное приближение:

$$R_2 = R_{02} = \frac{1}{\pi r_2^2 \sigma_2} \frac{1}{(k_c^2 - 1)}. \quad (3.120)$$

Оно допустимо, если $k_2 r_2 \leq 1$, $k_c < 2$, тогда $C_B = 2/k_2 r_2 (k_c^2 - 1)$.

При промежуточных частотах ($k_2 t_2 > 5$) вместо точных формул, приведенных выше, могут использоваться выражения, полученные с использованием разложений функций Бесселя в ряды [21]:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi r_2 \sigma_2} \left[\frac{k_2}{\sqrt{2}} \frac{\operatorname{sh} u + \sin u}{\operatorname{ch} u + \cos u} - \frac{4r_2 + t_2}{8r_B r_2} \right]; \quad (3.121)$$

$$L_2 = \frac{1}{2\pi r_2} \frac{k_2}{\omega \sigma_2} \frac{\operatorname{sh} u - \sin u}{\sqrt{2}(\operatorname{ch} u - \cos u)};$$

$$u = \sqrt{2} k_2 t_2; \quad r_B = r_2 + t_2.$$

Пример. Определим границы высокочастотного и низкочастотного приближения для медных трубчатых проводников с внутренним диаметром 0,3; 3 и 30 мм с коэффициентами тонкостенности 1,7; 1,2 и 1,07 соответственно.

Граница высоких частот, Гц	$9,7 \cdot 10^8$	$9,7 \cdot 10^6$	$9,7 \cdot 10^4$
Граница низких частот, Гц	$9,7 \cdot 10^4$	$9,7 \cdot 10^2$	$9,7$

Значения сопротивлений, соответствующие граничным частотам, равны:

Внутренний диаметр проводника, мм	0,3	3	30
Высокочастотное граничное R_2 , Ом/м	$8,65$	$8,65 \cdot 10^{-2}$	$8,65 \cdot 10^{-4}$
Низкочастотное граничное R_2 , Ом/м	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Сопоставление данных этого примера с предыдущим показывает, что границы высоких и низких частот внутреннего и внешнего проводников могут различаться более чем на порядок. Для расчетов взяты размеры, характерные для кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом.

Как указывалось, при частотах выше 200 МГц необходимо вводить поправочный коэффициент, учитывающий качество поверхности $k_{\text{пов}}$:

$$R_{f2} = R_2 k_{\text{пов}}.$$

В гофрированных трубчатых внешних проводниках путь тока удлиняется, а кроме того, сказывается нагартованность металла, что учитывается введением коэффициента увеличения потерь k_{a2} :

$$R_{f2} = R_2 k_{\text{пов}} k_{a2}.$$

Для сварных, спирально-гофрированных проводников $k_{a2} \approx 1,1 \div 1,15$.

Внешний проводник, выполненный в виде оплетки, имеет увеличенное по сравнению с трубчатым сопротивление (за счет спиральности и контактных сопротивлений), что также учитывается коэффициентом k_{a2} , называемым в данном случае коэффициентом оплетки.

Последний, как и коэффициент скрутки, зависит от ряда факторов, рассмотренных в § 3.8, в том числе от материала защитного покрытия проволок оплетки, что учитывается введением коэффициента покрытия k_p .

Все сказанное позволяет записать обобщенную формулу высокочастотного сопротивления внешнего проводника:

$$R_{f2} = R_2 k_{\text{пov}} k_{a2} k_p. \quad (3.122)$$

Расчет полного сопротивления кабеля должен выполняться с учетом (3.63), (3.68), (3.69) следующим образом:

$$\begin{aligned} Z = Z_1 + Z_2 + i\omega L_{\text{мп}} &= (R_{f1} + R_{f2}) + \\ &+ i\omega(L_1 + L_2 + L_{\text{мп}}) = R_f + i\omega L. \end{aligned} \quad (3.123)$$

Активное высокочастотное сопротивление кабеля

$$R_f = R_{f1} + R_{f2}.$$

Индуктивность кабеля

$$L = L_1 + L_2 + L_{\text{мп}},$$

где $L_{\text{мп}}$ – межпроводниковая индуктивность,

$$L_{\text{мп}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2 k_{\phi 2}}{r_1 k_{\phi 1}}. \quad (3.124)$$

Смысл коэффициентов формы ($k_{\phi 1}$ и $k_{\phi 2}$) поясняется в следующем параграфе.

Расчет емкости, проводимости изоляции и полной поперечной проводимости кабеля

Формулы (3.68), (3.69) для расчета *емкости и проводимости изоляции* справедливы для коаксиального кабеля с гладкими цилиндрическими проводниками, все пространство между которыми заполнено однородной изоляцией с характеристиками ϵ_a и $\operatorname{tg} \delta$. В реальных кабелях широко используются многопроволочные и гофрированные проводники и различные исполнения полу воздушной и воздушной изоляций. Для таких конструктивных схем применяются модифицированные формулы:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{зк}}}{\ln(r_2 k_{\phi 2}/r_1 k_{\phi 1})} = \frac{\epsilon_{\text{зк}} 10^{-9}}{18 \ln(d_2 k_{\phi 2}/d_1 k_{\phi 1})}, \quad (3.125)$$

где C – емкость кабеля, $\Phi/\text{м}$; $\epsilon_{\text{ЭК}}$ – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; $k_{\phi 2}$ и $k_{\phi 1}$ – коэффициенты формы внешнего и внутреннего проводников;

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}}, \quad (3.126)$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}}$ – эквивалентный тангенс угла диэлектрических потерь.

Учет влияния формы проводников обеспечивают коэффициенты формы. Если проводники имеют цилиндрическую форму, $k_{\phi 1} = k_{\phi 2} = 1$. Произведения $d_2 k_{\phi 2}$ и $d_1 k_{\phi 1}$ понимаются как эквивалентные диаметры цилиндрических внешнего и внутреннего проводников кабеля, имеющего такие же параметры, как и рассчитываемый.

Коэффициент формы скрученного правильной скруткой внутреннего проводника рассчитывается по формуле

$$k_{\phi 1} = 1,01(1 - 0,214 d_{\text{пр}}/d_1), \quad (3.127)$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволок; d_1 – диаметр по скрутке.

Расчеты по данной формуле почти совпадают со значениями, рекомендуемыми МЭК в Публикации 96-0:

Число проволок в					
проводнике	1	7	12	19	37
Коэффициент формы,					
$k_{\phi 1}$	1	0,939	0,957	0,970	0,980

Для многопроволочного проводника произвольной конструкции следует использовать формулу (3.98).

Коэффициент формы внешнего проводника в виде оплетки согласно Публикации 96-0 рассчитывается по формуле

$$k_{\phi 2} = 1 + 1,5 d_{\text{пр}}/d_2. \quad (3.128)$$

Пример. Рассчитать емкость кабелей РК 50-0,6-11 и РК 50-3-23 (размеры и конструкция приведены в табл. 7.1).

Марка	$d_1, \text{мм}$	$k_{\phi 1}$	$d_2, \text{мм}$	$k_{\phi 2}$	$C, \text{пФ/м}$	$C', \text{пФ/м}$
РК 50-0,6-11	0,21	0,939	0,6	1,15	101,1	120,6
РК 50-3-23	1,05	0,939	2,95	1,06	97,2	108,6

Здесь C' – емкость, рассчитанная без учета коэффициентов формы. Из примера видно, что учет коэффициентов особенно важен для субминиатюрных кабелей.

Если учитывать также линейную плотность оплетки Π_1 , то расчеты коэффициента формы внешнего проводника можно выполнять согласно (3.129) :

$$k_{\phi 2} = (1 + 0,2 d_{\text{пр}}/d_2) \Pi_1 + (1 + 2 d_{\text{пр}}/d_2) (1 - \Pi_1). \quad (3.129)$$

Рассмотрим методику расчета коэффициента формы гофрированного

внешнего проводника, поскольку этот тип проводников развивается наиболее интенсивно.

Пусть профиль внутреннего диаметра внешнего проводника описывается функцией $d_2(x)$, где x — продольная ось кабеля, а внутренний проводник однопроволочный, гладкий. Емкость отрезка кабеля длиной $\Delta x = x_2 - x_1$ при отсутствии диэлектрического заполнения можно определить из формулы

$$C_{\Delta x} = \frac{\epsilon_{\text{ЭК}} \Delta x 10^{-9}}{18 \ln(d_2 k_{\Phi 2} / d_1)},$$

где d_2 — внутренний диаметр внешнего проводника на просвет.

Для удобства расчетов участок Δx выбираем равным шагу гофрирования (рис. 3.33). С учетом профиля гофра как функции от координаты x имеем

$$C_{\Delta x} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\epsilon_{\text{ЭК}} 10^{-9} dx}{18 \ln[d_2(x) / d_1]}.$$
 (3.130)

Из равенства двух предыдущих выражений определим коэффициент формы:

$$k_{\Phi 2} = \frac{d_2}{d_1} e^M,$$
 (3.131)

где

$$M = (x_2 - x_1) \left/ \left\{ \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\ln[d_2(x) / d_1]} \right\} \right..$$

Если профиль гофра описывается синусоидальной функцией

$$d_2(x) = d_2 + \delta [1 + \cos(2\pi x/H)],$$

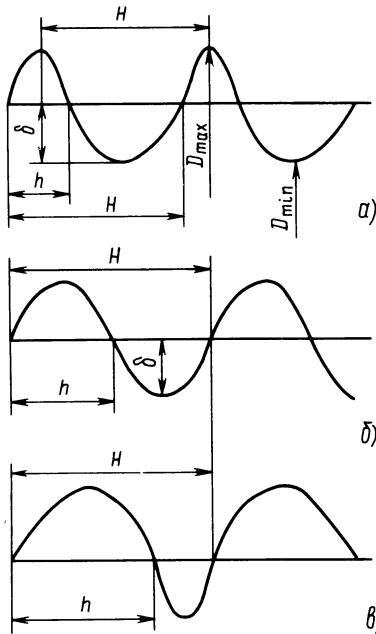
где δ — глубина гофрирования; H — шаг гофрирования, то выражение для показателя степени M имеет вид

$$M = H \left/ \left\{ 2 \int_0^{H/2} \frac{dx}{\ln\{d_2 + \delta[1 + \cos(2\pi x/H)]/d_1\}} \right\} \right..$$
 (3.132)

Результаты расчетов $k_{\Phi 2}$ (по 3.132) для симметричного гофрирования показывают, что его значение зависит от соотношения δ/d_2 и с точностью до 0,2% приближается многочленом:

$$k_{\Phi 2} = 1 + \delta/d_2 - 0,745(\delta/d_2)^2.$$
 (3.133)

Если профили вершин и впадин гофра описываются различными функциями $d_2^B(x)$ и $d_2^H(x)$, то емкость отрезка кабеля, равного шагу



← Рис. 3.33. Профиль гофров в продольном сечении кабеля

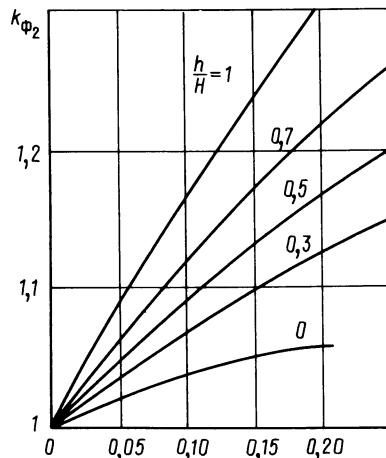


Рис. 3.34. Зависимость коэффициента формы гофрированного внешнего проводника от отношения δ/d_2 и h/H

гофрирования, определится по формуле

$$C_{\Delta x} = \frac{\epsilon_{\text{ЭК}} \cdot 10^{-9}}{18} \left\{ \int_0^h \frac{dx}{\ln[d_2^B(x)/d_1]} + \int_h^H \frac{dx}{\ln[d_2^H(x)/d_1]} \right\}. \quad (3.134)$$

Из равенства формул (3.130) и (3.134) получим

$$M = H \left/ \left\{ \int_0^h \frac{dx}{\ln[d_2^B(x)/d_1]} + \int_h^H \frac{dx}{\ln[d_2^H(x)/d_1]} \right\} \right.,$$

где h – длина основания вершины гофра вдоль оси кабеля.

На рис. 3.34 представлены зависимости коэффициента $k_{\Phi 2}$ от соотношения δ/d_2 и h/H . Следует отметить, что приведенные зависимости справедливы для кабелей с кольцевым гофром и пригодны для расчетов кабелей со спиральным гофром.

Для кабелей со сварным спирально гофрированным внешним проводником на основании [13] может быть рекомендована формула

$$k_{\Phi 2} = \frac{1 + \delta/d_2}{1 + \left[\frac{\delta/(d_2 + \delta)}{(d_2 + \delta)^2 - d_1} \right]^2}. \quad (3.135)$$

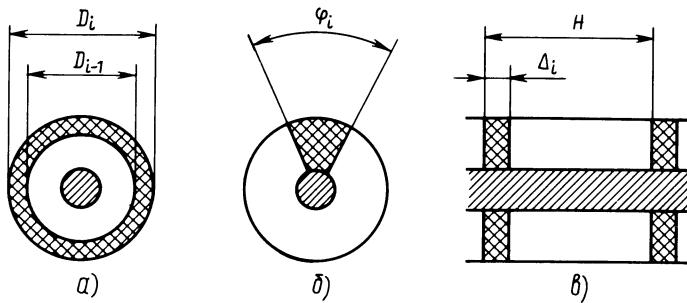


Рис. 3.35. Основные типы изоляции, имеющие точные решения для поля

При этом необходимо учесть поправку и на диаметр внутреннего проводника, даже в том случае, если он однопроволочный:

$$k_{\phi 1} = \frac{1}{1 + \left[\frac{d_1 \delta}{(d_2 + \delta)^2 - d_1^2} \right]^2} . \quad (3.136)$$

Расчет *эквивалентных параметров изоляции* необходим в конструкциях с несплошной изоляцией. В общем случае данная задача решается путем расчета электрических и магнитных полей, например, численными методами. Но в большинстве применяемых вариантов конструкций изоляции решения могут быть найдены упрощенными методами с приемлемой для практики точностью.

В радиально-комбинированной изоляции (рис. 3.35, а) эквипотенциальные поверхности электрического поля совпадают с границами раздела слоев изоляции, следовательно, для емкости слоя с номером i имеем

$$C_i = \frac{\epsilon_i 10^{-9}}{18 \ln(d_i/d_{i-1})} ,$$

где ϵ_i — относительная диэлектрическая проницаемость слоя; d_i — внешний диаметр слоя; d_{i-1} — внутренний диаметр слоя.

Суммарная емкость кабеля будет представлять собой цепочку частичных емкостей слоев, соединенных последовательно:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} = \frac{18}{10^{-9}} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_i/d_{i-1})}{\epsilon_i} ,$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18} \left/ \sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_1/d_{i-1})}{\epsilon_i} \right. .$$

Учитывая, что $d_n = d_2$, а $d_0 = d_1$, получаем

$$\epsilon_{\text{ЭК}} = \frac{\ln(d_2/d_1)}{\sum_{i=1}^n \ln(d_i/d_{i-1})/\epsilon_i} . \quad (3.137)$$

Выражение для расчета эквивалентной величины диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}}$ можно получить из отношения суммарной активной мощности потерь системы последовательно соединенных конденсаторов к суммарной реактивной [54] :

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}} = P/P_q,$$

где $P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$; $P_q = U^2 \omega C$; U – напряжение между проводниками коаксиальной пары.

Учитывая, что для системы последовательно соединенных конденсаторов $C = \left[\sum_{i=1}^n (1/C_i) \right]^{-1}$, а также равенство зарядов смещения на границе раздела слоев изоляции, получим выражения для активной и реактивной мощности потерь в i -м слое изоляции: $P_i = U^2 \omega C_i \operatorname{tg} \delta_i / C_i$; $P_q = U^2 \omega C_i^2 / C_i$. Из соотношения этих величин получим

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}} = \sum_{i=1}^n (\operatorname{tg} \delta_i / C_i) \left[\sum_{i=1}^n (1/C_i) \right]^{-1} .$$

С учетом выражений для C_i получим

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}} = \frac{\sum_{i=1}^n \operatorname{tg} \delta_i \ln(d_i/d_{i-1})/\epsilon_i}{\sum_{i=1}^n \ln(d_i/d_{i-1})/\epsilon_i} . \quad (3.138)$$

В частном, но распространенном случае двухслойной изоляции на основании приведенных формул, а также учитывая коэффициенты формы проводников, получим

$$\epsilon_{\text{ЭК}} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \ln(d_2 k_{\Phi 2} / d_1 k_{\Phi 1})}{\epsilon_2 \ln(d'_1 / d_1 k_{\Phi 1}) + \epsilon_1 \ln(d_2 k_{\Phi 2} / d'_1)} ; \quad (3.139)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}} = \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2 \ln(d_2 k_{\Phi 2} / d'_1) + \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1 \ln(d'_1 / d_1 k_{\Phi 1})}{\epsilon_2 \ln(d'_1 / d_1 k_{\Phi 1}) + \epsilon_1 \ln(d_2 k_{\Phi 2} / d'_1)} , \quad (3.140)$$

где ϵ_1 и $\operatorname{tg} \delta_1$ – параметры первого от внутреннего проводника слоя изоляции; ϵ_2 и $\operatorname{tg} \delta_2$ – то же для второго слоя; d'_1 – диаметр по первому слою изоляции.

Под тангенциаль но - комбинированной изоляцией понимаются исполнения, в которых граница раздела диэлектриков проходит вдоль радиуса (рис. 3.35, б). Суммарная емкость кабеля с такой изоляцией образуется за счет параллельного соединения частичных емкостей:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \frac{10^{-9}}{18 \ln(d_2 k_{\phi 2}/d_1 k_{\phi 1})} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \varphi_i / 2\pi,$$

где ϵ_i — относительная диэлектрическая проницаемость i -го сектора изоляции; φ_i — угол при вершине i -го сектора, рад.

Решая данное выражение совместно с (3.125) и (3.126), получаем выражения для эквивалентных значений:

$$\epsilon_{\text{эк}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \varphi_i ; \quad (3.141)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \varphi_i \operatorname{tg} \delta_i \sqrt{\sum_{i=1}^n \epsilon_i \varphi_i} . \quad (3.142)$$

Для частного случая воздушной изоляции, выполненной прямоугольным корделием, который в поперечном сечении близок к сектору, имеем

$$\epsilon_{\text{эк}} = 1 + (\epsilon_k - 1)\varphi/2\pi; \quad (3.143)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{эк}} = \frac{\epsilon_k \operatorname{tg} \delta_k \varphi}{2\pi + (\epsilon_k - 1)\varphi} , \quad (3.144)$$

где ϵ_k и $\operatorname{tg} \delta_k$ — параметры материала корделя; φ — угол, занимаемый корделием в поперечном сечении, рад.

Отношение $\varphi/2\pi$ характеризует заполненность изоляции диэлектриком p_d . С помощью этого обозначения мы можем получить обобщенный вид уравнения для $\epsilon_{\text{эк}}$ и $\operatorname{tg} \delta_{\text{эк}}$, справедливый для многих исполнений:

$$\epsilon_{\text{эк}} = 1 + (\epsilon_d - 1)p_d; \quad (3.145)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{эк}} = \frac{\epsilon_d \operatorname{tg} \delta_d p_d}{1 + (\epsilon_d - 1)p_d} , \quad (3.146)$$

где ϵ_d и $\operatorname{tg} \delta_d$ — параметры диэлектрического заполнения.

Заполненность изоляции, выполненной прямоугольным корделием, может быть выражена также следующим образом:

$$p_d = b \sqrt{\frac{1}{H^2} + \frac{4}{\pi(d_2^2 - d_1^2)}} ,$$

где b — ширина корделя; H — шаг наложения корделя.

В случае изоляции, выполненной круглым корделием, формулы (3.145) и (3.146) справедливы, а заполненность изоляции определяется по формуле

$$p_d = \frac{k_y^2}{\pi} \ln \frac{d_2 k_{\phi 2}}{d_1 k_{\phi 1}},$$

где k_y – коэффициент "укрутки" корделя, вычисляемый как отношение длины корделя к длине кабеля (см. гл. 5).

Все большее распространение получает пористая полувоз-душина изоляция, для определения эквивалентных параметров которой также применимы формулы (3.145), (3.146), а заполненность изоляции диэлектриком может быть определена через относительный объем исходного материала в пористом, который равен отношению плотности пористого материала $\gamma_{\text{пор}}$ к плотности исходного γ_d :

$$p_d = \gamma_{\text{пор}} / \gamma_d.$$

В случае продольно-комбинированной изоляции, наиболее распространенным частным случаем которой является шайбовая изоляция, заполненность последней равна отношению ширины опорного элемента Δ и шагу его установки H (рис. 3.34, в):

$$p_d = \Delta / H.$$

Для изоляции сложной структуры, когда параметры диэлектрического промежутка между внешней поверхностью проводника и внутренней поверхностью внешнего проводника переменны по трем координатам, осуществить выбор какой-либо из рассмотренных расчетных моделей достаточно трудно. В таком случае может быть рекомендовано разбиение кабеля на однородные отрезки, если удобно рассматривать продольную модель (например, для трубчато-шайбовой изоляции), или сектора (для изоляции спирального типа), в пределах которых структура может быть рассмотрена с точки зрения предложенных ранее моделей. Если положить, что внутри выбранной области электрическое поле постоянно, для дальнейших расчетов могут быть применены формулы:

$$\epsilon_{\text{ЭК}} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \epsilon_i v_i; \quad (3.147)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ЭК}} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \operatorname{tg} \delta_i v_i / \sum_{i=1}^n \epsilon_i v_i, \quad (3.148)$$

где n – число областей или компонент изоляции; V – полный объем рассматриваемого участка изоляции; $v_i, \epsilon_i, \operatorname{tg} \delta_i$ – относительный объем, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь i -й области или компоненты изоляции.

Относительно выбранных областей ϵ_i и $\operatorname{tg}\delta_i$ в приведенных формулах имеют смысл эквивалентных значений.

В общем случае может быть предложена методика расчета, основанная на предположении, что по кабелю сложной конструкции распространяется квази Т-волна. Резонансные явления в кабеле отсутствуют.

Переменные по длине размеры элементов изоляции можно описать как функции от координат r , φ , x цилиндрической системы. Для удобства ось x цилиндрической системы координат необходимо совместить с продольной осью кабеля.

Если параметры изоляции не зависят от угла φ , а в каждом сечении x (рис. 3.35) изоляцию можно рассматривать как радиально-комбинированную, причем для каждого слоя с радиусом $r_i(x)$ значения $\epsilon_i(x)$, $\operatorname{tg}\delta_i(x)$ определяются по формулам (3.137), (3.138), то на участке от x_1 до x_2 эквивалентные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь можно определить как интегральные характеристики.

В том случае, когда изменения элементов кабеля по длине описываются непрерывными периодическими функциями, участок интегрирования выбирается по элементу, имеющему наибольший период:

$$\epsilon_{\text{ЭК}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{R(x)}{r(x)} dx ; \quad (3.149)$$

$$\epsilon_{\text{ЭК}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{r_i(x)}{r_{i-1}(x)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\epsilon_i}} ;$$

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{ЭК}} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \left[\left(\sum_{i=1}^n \ln \frac{r_i(x)}{r_{i-1}(x)} \right) / \epsilon_i \right]^{-2} x}{\int_{x_1}^{x_2} \left[\sum_{i=1}^n \frac{\operatorname{tg}\delta_i}{\epsilon_i} \ln \frac{r_i(x)}{r_{i-1}(x)} \right] dx} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{r_i(x)}{r_{i-1}(x)} \right) / \epsilon_i}}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{r_i(x)}{r_{i-1}(x)} \right) / \epsilon_i}} , \quad (3.150)$$

где $R(x)$ – функция, описывающая профиль внутренней поверхности внешнего проводника; $r(x)$ – функция, описывающая профиль поверхности внутреннего проводника; $r_i(x)$, $r_{i-1}(x)$ – функции профилей i -го и $(i-1)$ -го слоев изоляции.

Вычисление полной поперечной проводимости изоляции кабеля должно выполняться по формуле (3.126), в которую вместо C и $\operatorname{tg}\delta$ подставляют соответствующие значения емкости кабеля и эквивалентное значение $\operatorname{tg}\delta_{\text{ЭК}}$.

Расчет вторичных параметров

Вторичные параметры радиочастотного кабеля определяются по результатам расчетов первичных. На высоких частотах, как показано в п. 3.6, могут использоваться упрощенные формулы. Расчеты рекомендуется выполнять в следующей последовательности: 1) волновое сопротивление; 2) коэффициенты распространения, затухания и фазы; 3) критическая частота; 4) параметры, связанные со скоростью распространения электромагнитной волны.

Волновое сопротивление может быть определено по формуле (3.70), однако чаще употребляется показательная форма записи (3.11):

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R_f + i\omega L}{G + i\omega C}} = |Z_B| e^{i\varphi},$$

где

$$|Z_B| = 4 \sqrt{\frac{R_f^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}} ; \quad (3.151)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\omega L G - \omega C R_f}{R_f G - \omega^2 L C} . \quad (3.152)$$

Как видно из приведенных формул, модуль $|Z_B|$ и аргумент φ волнового сопротивления зависят от частоты, следовательно, их значения должны быть вычислены во всем рабочем диапазоне частот. Однако на высоких частотах, когда выполняются условия, приведенные выше при определении сопротивления проводников, волновое сопротивление становится чисто активным, $\varphi = 0$, и справедлива формула (3.71), которая с учетом коэффициентов формы имеет вид

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}} \ln \frac{d_2 k_{\Phi 2}}{d_1 k_{\Phi 1}} . \quad (3.153)$$

В случае эксцентричного расположения внутреннего проводника расчет волнового сопротивления рекомендуется проводить по формуле [32]

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}} \ln (A + \sqrt{A^2 - 1}),$$

где $A = 0,5 [d_1/d_2 + d_2/d_1 (1 + E^2)]$; $E = 2e/d_2$ — эксцентриситет внутреннего проводника, т.е. его смещение относительно оси кабеля (e), отнесенное к радиусу изоляции.

Расчет коэффициентов распространения, затухания и фазы выполняется согласно

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

где γ – коэффициент распространения; α – коэффициент затухания, дБ/м; β – коэффициент фазы, рад/м;

$$\alpha = \sqrt{1/2(R_f G - \omega^2 LC) + \sqrt{R_f^2 + \omega^2 L^2}(G^2 + \omega^2 C^2)} \cdot 8,689; \quad (3.154)$$

$$\beta = \sqrt{1/2(\omega^2 LC - R_f G) + \sqrt{(R_f^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}}. \quad (3.155)$$

На высоких частотах справедливы формулы (3.72) и (3.73) и приведенные ниже:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{R_f}{2Z_B} + \frac{G}{2} Z_B + i\omega \sqrt{L_{\text{мп}} C}; \\ \alpha &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_{iz} = \left(\frac{R_{f1}}{2Z_B} + \frac{R_{f2}}{2Z_B} + \frac{G}{2} Z_B \right) 8,689; \end{aligned} \quad (3.156)$$

$$\beta = \omega \sqrt{L_{\text{мп}} C} = \frac{2f \sqrt{\epsilon_{\text{эк}} 10^{-8}}}{3\pi} \quad \text{при } \mu_{iz} = 1, \quad (3.157)$$

где α_1 – коэффициент затухания во внутреннем проводнике; α_2 – то же самое во внешнем проводнике; α_{iz} – то же в изоляции.

Температурная зависимость коэффициента затухания (высокочастотное приближение) кабелей с монометаллическими проводниками.

Приведенные ниже формулы справедливы в пределах прямолинейной зависимости удельного электрического сопротивления от температуры. Для таких металлов, как медь, алюминий, серебро, прямолинейная зависимость наблюдается при $-200 \div +200^\circ\text{C}$ (см. гл. 4):

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1(T_1) &= \alpha_1 \sqrt{1 + TK\rho_1(T_1 - 293)}; \\ \alpha_2(T_2) &= \alpha_2 \sqrt{1 + TK\rho_2(T_2 - 293)}; \\ \alpha_{iz}(T_{iz}) &= \alpha_{iz} \operatorname{tg}\delta_{\text{эк}}(T_{iz}) / \operatorname{tg}\delta_{\text{эк}293}; \\ \alpha(T) &= \alpha_1(T_1) + \alpha_2(T_2) + \alpha_{iz}(T_{iz}), \end{aligned} \right\} \quad (3.158)$$

где T_1 – температура внутреннего проводника; T_{iz} – средняя температура изоляции; T_2 – температура внешнего проводника; $TK\rho_1$ и $TK\rho_2$ – температурные коэффициенты сопротивления для металлов внутреннего и внешнего проводников соответственно; $\operatorname{tg}\delta_{\text{эк}}(T_{iz})$ – эквивалентный тангенс угла диэлектрических потерь с учетом температурного изменения потерь в материалах изоляции.

Таблица 3.4. Формулы параметров, связанных со скоростью распространения электромагнитной волны в кабеле

Наименование параметра	Точная формула	Высокочастотное приближение
Фазовая скорость, м/с	$v_\phi = \omega/\beta$	$v_\phi = v_{\text{св}}/\sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}$
Групповая скорость, м/с	$v_{\text{grp}} = \Delta\omega/\Delta\beta$	$v_{\text{grp}} = v_\phi = v_{\text{св}}/\sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}$
Временная задержка, с/м	$\tau = 1/v_{\text{grp}}$	$\tau = \sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}/v_{\text{св}}$
Длина волны в кабеле, м	$\lambda_K = 2\pi/\beta$	$\lambda_K = v_{\text{св}}/f\sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}$
Коэффициент укорочения длины волны в кабеле	$\epsilon = \lambda/\lambda_K = v_{\text{св}}/v_\phi$	$\epsilon = \sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}$

В общем случае, например, при передаче высокочастотной мощности $T_1 \neq T_2 \neq T_{\text{из}}$. Если же нагрев определяется внешним источником тепла, $T_1 = T_2 = T_{\text{из}}$.

Изменение коэффициента затухания с температурой характеризуется температурным коэффициентом затухания (ТКЗ), среднее значение которого на частоте f для заданного интервала ($T_{\max} \div T_{\min}$) температур определяется по формуле

$$\text{ТКЗ} = \frac{\alpha(T)_{\max} - \alpha(T)_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \frac{1}{\alpha(T_{293})}, \quad (3.159)$$

где $\alpha(T_{293})$ – коэффициент затухания на той же частоте при нормальной температуре.

Расчет *критической частоты* выполняется по формуле

$$f_{Kp} = \frac{2v_{\text{св}}}{\pi(d_2 k_{\phi 2} + d_1 k_{\phi 1})\sqrt{\epsilon_{\text{ЭК}}}}, \quad (3.160)$$

где $v_{\text{св}}$ – скорость света в вакууме, м/с.

Расчет *параметров, связанных со скоростью распространения* электромагнитной волны в кабеле, можно выполнить по формулам, приведенным в табл. 3.4.

Расчет сопротивления связи

Оно характеризует экранные свойства внешнего проводника, зависит от его конструктивного исполнения.

Для внешнего проводника трубчатого монометаллического [21]

$$Z_{12}^T = \frac{\sqrt{i}k_2\rho_2}{2\pi\sqrt{r_2r_B}} \cdot \frac{1}{\sinh\sqrt{i}k_2t_2}. \quad (3.161)$$

Размерность сопротивления связи – Ом/м. Использованы обозначения, принятые ранее. Высокочастотное приближение справедливо, если

$k_2 r_2 \geq 100$ и $k_c > 1,05$,

$$Z_{12}^T = \frac{2k_2 \rho_2 e^{-t_2/\theta}}{\pi(d_2 + t_2)} \left[\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{t_2}{\theta}\right) + i \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{t_2}{\theta}\right) \right],$$

где θ — глубина проникновения поля во внешний проводник, равная $\theta = \sqrt{2/k_2}$.

На низких частотах, при которых $k_2 r_2 \ll 1$ и $k_c < 2$, сопротивление связи равно сопротивлению трубы на постоянном токе:

$$Z_{12}^T = R_{02} = \frac{1}{\pi r_2^2 \sigma_2 (k_c^2 - 1)}.$$

Для внешнего проводника, выполненного в виде оплетки из монометаллической проволоки [1]:

$$\begin{aligned} Z_{12}^{\text{опл}} = Z_{12}^T + Z_{12}^0 &= \frac{\sqrt{i} k_2 \rho_2}{2\pi \sqrt{r_2 r_B}} \frac{1}{\sinh \sqrt{i} k_2 t_2} + \\ &+ i \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{3a} f(1 - \Pi_{\text{опл}}) \sqrt{\frac{(1 - \Pi_{\text{опл}}) h}{d_2 + 2d_{\text{пп}}}}. \end{aligned} \quad (3.162)$$

В данном случае под r_B понимается внешний диаметр оплетки, а под t_2 — радиальная толщина оплетки; a — число прядей одного направления; h — шаг оплетки. Остальные обозначения прежние.

Внешний проводник с узкой продольной щелью [21] представляет все больший интерес в связи с развитием технологий продольного наложения фольги и фольгированных пластмассовых лент:

$$\begin{aligned} Z_{12}^{\text{щ}} = Z_{12}^T + Z_{12}^{\text{щ}} &= \frac{\sqrt{i} k_2 \rho_2}{2\pi \sqrt{r_2 r_B}} \frac{1}{\sinh \sqrt{i} k_2 t_2} + \\ &+ i\omega \frac{\mu_0 a^2}{\pi^3 r_2^2} \left[1 + (1 + i) \left(2 + \pi + \frac{\pi t_2}{a} \right) \frac{\theta}{a} e^{-\left(\frac{\pi t_2}{a} + 2\right)} \right], \end{aligned} \quad (3.163)$$

где t_2 — толщина фольги; a — ширина щели.

В двух последних случаях, так же как и для сплошной трубы, сопротивление связи на низких частотах равно сопротивлению внешнего проводника на постоянном токе.

Расчет номинальной мощности на входе кабеля

Радиочастотные кабели могут использоваться как в приемных трактах (при малом уровне мощности), так и в передающих (при большом уровне мощности). Поэтому для радиочастотных кабелей расчет передаваемой мощности, как правило, выполняется. Номинальная мощность — это мощность СВЧ, которая может быть подана на вход радио-

частотного кабеля в режиме согласованной нагрузки, без опасности перегреть наиболее слабый элемент кабеля (обычно изоляцию) сверх допустимой температуры.

При передаче СВЧ-энергии по радиочастотному кабелю в нем из-за потерь в проводниках и изоляции происходит выделение тепла, которое рассеивается в окружающую среду. Рассеяние тепла происходит посредством теплопроводности, конвекции и радиации (лучеиспускания). Обычно рассчитываются мощностные параметры кабеля в воздухе, в этом случае отвод тепла за счет теплопроводности не учитывается ввиду незначительности.

Будем рассматривать установившийся режим, при котором тепловое состояние кабеля стабилизировалось и тепловые свойства не меняются во времени. При этом справедливо выражение

$$\theta_{\text{доп}} = T_1 - T_{\text{o.c}} = SW,$$

где $\theta_{\text{доп}}$ – допустимый по свойствам кабеля перепад температур между внутренним проводником и окружающей средой, К; $T_{\text{o.c}}$ – температура окружающей среды, К; S – суммарное тепловое сопротивление элементов кабеля и окружающей среды, К·м/Вт; W – общий тепловой поток, создаваемый в кабеле, Вт.

Изменение мощности вдоль регулярного кабеля с согласованной нагрузкой определяется выражением

$$P_x = P_0 e^{-2\alpha(T)x},$$

где P_x – мощность в сечении x ; P_0 – номинальная мощность на входе. Данное выражение получено при условии, что $Z_l = Z_B$.

Из формул (3.15) и (3.16) имеем:

$$U_x = U_0 e^{-\gamma x}; \quad I_x = I_0 e^{-\gamma x}.$$

Получаем вышеприведенную формулу для уменьшения мощности вдоль кабеля, учитывая, что изменение фазы векторов напряжения и тока одинаково.

Рассеиваемая на участке dx мощность преобразуется в тепловой поток, выделяемый кабелем:

$$W_x = - \frac{dP_x}{dx} = - \frac{d}{dx} (P_0 e^{-2\alpha(T)x}) = 2\alpha(T) P_0 e^{-2\alpha(T)x}.$$

Очевидно, что максимальное тепловыделение будет в начале линии, при $X = 0$, и будет складываться из тепла, выделяемого внутренним и внешним проводниками и изоляцией:

$$W = 2\alpha(T)P_0 = 2[\alpha_1(T_1) + \alpha_2(T_2) + \alpha_{из}(T_{из})]P_0 = W_1 + W_2 + W_{из}. \quad (3.164)$$

На рис. 3.36 приведена тепловая схема замещения коаксиального радиочастотного кабеля, в которой из-за высокой теплопроводности металлов мы пренебрегаем тепловыми сопротивлениями внутреннего и внешнего проводников. В соответствии с тепловой схемой замещения перепад температуры между внутренним проводником и окружающей средой

$$\theta_{доп} = T_1 - T_{о.с} = W_1(S_{из} + S_{о.б} + S_{о.с}) + W_2(S_{о.б} + S_{о.с}) + W_{из}\left(\frac{1}{2}S_{из} + S_{о.б} + S_{о.с}\right). \quad (3.165)$$

Решаем совместно уравнения (3.164) и (3.165) относительно P_0 :

$$P_0 = \frac{(T_1 - T_{о.с}) 8,689}{[2\alpha_1(T_1) + \alpha_{из}(T_{из})]S_{из} + 2\alpha(T)(S_{о.б} + S_{о.с})}, \quad (3.166)$$

где $S_{из}$ — тепловое сопротивление изоляции; $S_{о.б}$ — то же у оболочки; $S_{о.с}$ — то же окружающей среды; $\alpha_1(T_1)$, $\alpha_2(T_2)$ и $\alpha_{из}(T_{из})$ — коэффициенты затухания во внутреннем проводнике, внешнем проводнике и изоляции при соответствующих температурах, дБ/м; $\alpha(T)$ — коэффициент затухания кабеля, определенный согласно (3.158).

При вычислениях по формуле (3.166) максимально допустимая температура на внутреннем проводнике обычно известна заранее или задается, а температура внешнего проводника и поверхности кабеля могут быть заданы в первом цикле расчетов только приближенно. Обычно температура окружающей среды принимается равной 313 К (40°C). Рекомендуется в первом цикле принимать для кабелей с полиэтиленовой изоляцией $T_{о.б} - T_{о.с} = 20$ К, а для кабелей с фторопластовой изоляцией, имеющих рабочую температуру 473 К (200°C), принимать $T_{о.б} - T_{о.с} = 70$ К. В последующих циклах производится уточнение принятых значений и вычисляется окончательное значение номинальной мощности. Для этого по вычисленному в первом цикле значению P_0 следует определить:

$$T_{о.б} = 2\alpha(T)P_0S_{о.с} + T_{о.с};$$

$$T_2 = 2\alpha(T)P_0S_{о.б} + T_{о.б};$$

$$T_{из} = (T_1 - T_2)/2.$$

По новым значениям температур $T_{из}$, T_2 , $T_{о.б}$ следует уточнить величины коэффициентов затухания в изоляции, во внешнем проводнике, теплового сопротивления окружающей среды и номинальной мощности;

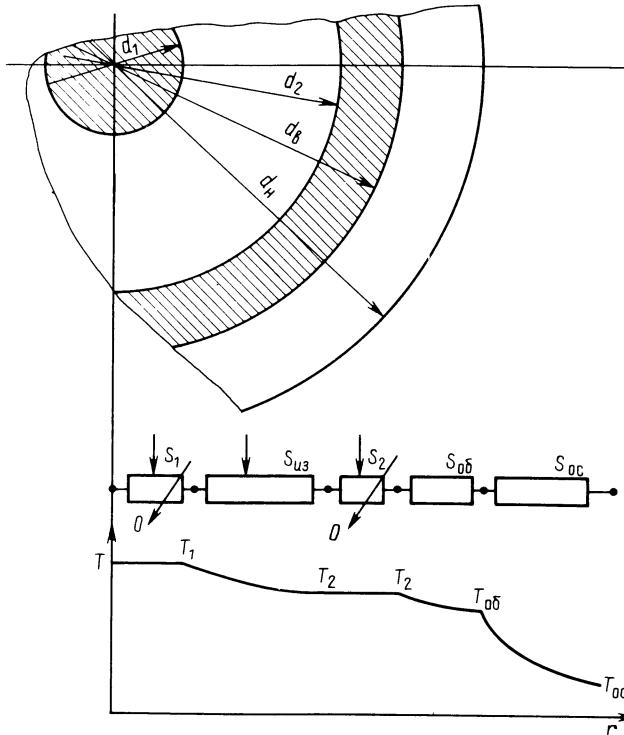


Рис. 3.36. Тепловая схема замещения коаксиального радиочастотного кабеля и типовой график изменения температуры

еще раз проверить температуры $T_{из}$, T_2 и $T_{0\delta}$. Подобные вычисления повторять до тех пор, пока значения температур, получаемые в двух последовательных циклах, будут различаться не более чем на один градус.

Расчет *тепловых сопротивлений* изоляции и оболочек из однородного материала выполняется по формулам:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad S_{0\delta} = \frac{\sigma_{0\delta}}{2\pi} \ln \frac{d_h}{d_B}, \quad (3.167)$$

где $\sigma_{из}$ и $\sigma_{0\delta}$ – удельные тепловые сопротивления материалов изоляции и оболочки (см. гл. 4), К·м/Вт; d_h – наружный диаметр кабеля, мм; d_B – внутренний диаметр оболочки, мм.

В случае многослойной изоляции ее тепловое сопротивление определяется как сумма тепловых сопротивлений отдельных слоев. В кордельной изоляции основное сопротивление оказывает часть, заполненная воздухом. Эквивалентное тепловое сопротивление слоя кордельной изоляции рекомендуется определять по формуле [3]

$$S_{K3} = \frac{\sigma_K}{\frac{2,73(\sigma_K/\sigma_B)}{\ln(d_0 + 2d_K/d_0)} + \frac{0,637(1 - \sigma_K/\sigma_B)}{\sin^2 \alpha}}, \quad (3.168)$$

где $\sin \alpha = h / \sqrt{\pi^2 (d_0 + d_K)^2 + h^2}$ – синус угла наложения корделя; d_0 – диаметр сердечника, мм; d_K – диаметр корделя, мм; σ_K – удельное тепловое сопротивление материала корделя, К·м/Вт; σ_B – удельное тепловое сопротивление воздуха, К·м/Вт.

Тепловое сопротивление воздуха существенно зависит от температуры. При расчетах кабелей с полиэтиленовой изоляцией, имеющей обычно температуру около 333 К (60°C), рекомендуется $\sigma_B = 34$ К·м/Вт. У кабелей с фторопластовой изоляцией средняя температура изоляции 433 К (160°C) и $\sigma_B = 28$ К·м/Вт.

Тепловое сопротивление окружающей среды, как правило, заметно преобладает над тепловым сопротивлением элементов кабеля. Для его расчета рекомендуется следующая последовательность действий:

определить значение критерия Грасгофа [39] :

$$Gr = \frac{g}{\nu^2} d_H^3 \frac{2(T_{ob} - T_{oc})}{T_{ob} + T_{oc}} 10^{-9}, \quad (3.169)$$

где g – ускорение свободного падения, $9,8$ м/с 2 ; ν – кинематическая вязкость воздуха, м 2 /с;

кинематическая вязкость воздуха зависит от температуры, ее необходимо найти по таблицам свойств воздуха [39] для

$$T = \frac{T_{ob} + T_{oc}}{2};$$

уточнить значение критерия Прандтля по таблицам свойств воздуха, но с достаточной степенью точности можно принять

$$Pr = 0,7;$$

определить значение критерия Нуссельта:

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^m.$$

Значения коэффициентов c и m зависят в основном от наружного диаметра кабеля и должны приниматься согласно табл. 3.5;

определить коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м 2 ·К:

$$\alpha_K = Nu \lambda_B / d_H, \quad (3.170)$$

где λ_B – теплопроводность воздуха, находится по таблицам свойств воздуха;

определить коэффициент радиационной теплоотдачи, Вт/м²·К:

$$\alpha_p = \epsilon_r C_0 \frac{T_{об}^4 - T_{oc}^4}{T_{об} - T_{oc}}, \quad (3.171)$$

где ϵ_r – степень черноты поверхности кабеля, находится по таблицам [39]; C_0 – постоянная излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана–Больцмана),

$$C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4;$$

определить тепловое сопротивление окружающей среды, К·м/Вт:

$$S_{oc} = \frac{1}{\pi d_h (\alpha_k + \alpha_p)} . \quad (3.172)$$

Расчеты электрических параметров радиочастотных кабелей по формулам, приведенным в данной главе, целесообразно выполнять в порядке, рекомендуемом гл. 2, с использованием данных по свойствам материалов из гл. 4 и сведений по конструкциям кабелей из гл. 7.

ГЛАВА 4

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

4.1. СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Конструкторов, изготовителей и потребителей радиочастотных кабелей из всего многообразия свойств, характеризующих материалы, в первую очередь интересуют: электрические, механические, эксплуатационные и технологические. Удачное сочетание указанных свойств, а также их экономичность и недефицитность определяют в конечном счете выбор материала.

Медная проволока и медные материалы наиболее часто применяются для проводников радиочастотных кабелей, так как они обладают удачным сочетанием указанных свойств [40]. Главное достоинство меди – она лучший проводник электричества из недрагоценных металлов. Именно поэтому для электротехники потребляется до 50% всей добываемой меди. Медь прекрасно обрабатывается методами прокатки, волочения, скрутки, формования и обладает достаточно высокой коррозионной стойкостью. Однако медь обладает большой плотностью и недостаточной механической прочностью.

Таблица 3.5. Значения коэффициентов c и m

Величина $Gr \cdot Pr$	c	m
$10^{-4} - 10^{-3}$	0,50	0
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	0,33

В радиочастотных кабелях используются круглые и плоские медные проволоки, трубы, ленты и фольга. Наибольшее распространение получила медная круглая проволока, основные требования к которой даны в ГОСТ 2112-79. Она применяется для однопроволочных, скрученных и плетеных проводников. Плоская проволока (ГОСТ 434-78) применяется для внешних проводников в ряде крупногабаритных кабелей, например РК 50-13-15, РК 50-24-15, РК 75-44-15. Медная лента ранее применялась для скрепления повива плоских проволок в указанных кабелях. В настоящее время применение лент значительно расширилось, так как из них формуются внешние проводники полужестких и полугибких кабелей. Медные трубы (ГОСТ 11383-75) применяются для внешних проводников миниатюрных полужестких кабелей классической конструкции и для облегчения внутренних проводников крупногабаритных кабелей. Для внешних проводников миниатюрных полугибких кабелей наиболее целесообразно применять медную фольгу.

При механической обработке медных материалов, особенно путем холодного волочения и прокатки, предел прочности повышается примерно в 2 раза, а относительное удлинение резко падает (до 1–2%). Электропроводность также уменьшается на 1–3%. Для восстановления электропроводности и пластических свойств производят отжиг. Все примеси понижают электропроводность, поэтому для производства проводниковых материалов используется электролитическая медь марок М0 и М1 с суммарным содержанием примесей не более 0,05 и 0,1% соответственно.

Бронзовая проволока. Размеры внутренних проводников миниатюрных и субминиатюрных радиочастотных кабелей настолько малы (0,06–0,18 мм), что их прочность недостаточна. С целью повышения прочности и надежности для внутренних проводников используются специальные сорта бронз с малым содержанием легирующих добавок: хрома, циркония, кадмия, олова или титана, благодаря чему такие бронзы обладают примерно 85% проводимости меди. Механическое упрочнение достигается за счет эффекта дисперсионного твердения сплава при специальной обработке проволоки. В отечественных радиочастотных кабелях получила распространение проволока из бронзы марки БрХЦрК, содержащая присадки хрома, циркония и кальция в сумме не более 1% [40].

Важное достоинство бронзовой проволоки – она имеет диамагнитные свойства, как и медная.

Алюминий и алюминиевые материалы начали широко употребляться промышленностью менее ста лет назад. Алюминий занимает второе место по электропроводности среди технических материалов и широко применяется в электротехнике [41]. Его применение в радиочастотных кабелях пока весьма ограничено. Однако известны конструкции среднегабаритных и крупногабаритных кабелей с диаметром по изоляции 7 мм и более, внешние проводники которых выполнены в виде прессованной алюминиевой трубы. Такое применение алюминия достаточно перспективно.

тивно, так как, увеличивая коэффициент затухания по сравнению с аналогичной медной трубкой только на 7%, дает значительный выигрыш по массе (до 40%). Прессованные алюминиевые внешние проводники чаще всего применяются в кабелях для кабельного телевидения.

Второе развивающееся направление – применение алюминиевой фольги, дублированной пластмассовыми пленками, для внешних проводников полугибких кабелей.

Биметаллические и триметаллические проволоки. Для компенсации недостаточной механической прочности и теплостойкости чистых материалов в радиочастотных кабелях широко используются композиционные. В первую очередь это биметаллическая сталемедная проволока, получаемая методом плакирования [40]. Медь составляет около трети массы проволоки. Стalemедная проволока превосходит медную по прочности и применяется для внутренних проводников миниатюрных кабелей. Но в ряде применений, например в генераторах СВЧ на железоиттриевом гранате, использование радиочастотных кабелей со сталемедной проволокой нежелательно из-за ферромагнитных свойств стального сердечника. В технических условиях на сталемедную проволоку толщина медного слоя не указывается, если найти (по справочникам или экспериментально) среднюю плотность проволоки, толщину слоя можно определить по формуле

$$\Delta = \frac{d}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\gamma_{cm} - \gamma_c}{\gamma_m - \gamma_c}} \right), \quad (4.1)$$

где d – диаметр биметаллической проволоки; γ_{cm} – средняя плотность биметаллической проволоки; γ_m – плотность покрытия, в частности меди; γ_c – плотность сердечника, в частности стали.

Ограниченнное применение, в основном в кабелях для кабельного телевидения, нашла алюмомедная проволока диаметром 1,3–5,0 мм. Доля меди в объеме алюмомедной проволоки 10–15%, толщина медного слоя 0,01–0,03 мм [42].

Частотный диапазон использования радиочастотных кабелей диктует высокие требования к качеству поверхности проводниковых материалов. Так, при частоте 10^8 Гц полная глубина проникновения поля в медный проводник 0,02 мм, а при 10^9 Гц – всего 0,006 мм. Для защиты поверхности медных проводников от окисления, которое начинается при температурах выше 150°C (423 К), уменьшения контактного сопротивления и повышения технологичности монтажа радиочастотных кабелей ее покрывают тонким слоем серебра или олова. Проводимость серебра незначительно превышает проводимость меди, но главные его достоинства в том, что до температуры 250°C (523 К) не происходит сколько-нибудь заметного роста слоя окиси Ag_2O , а во-вторых, серебро имеет самое низкое контактное сопротивление [40, 43], которое в 6–10 раз меньше контактного сопротивления меди. Оба эти свойства используют в тепло-

стойких кабелях и в кабелях с повышенной стабильностью электрических параметров. Особенно велик эффект серебряных покрытий в гибких многопроволочных конструкциях. На поверхности медных проводников при воздействии повышенных температур образуется слой оксида двухвалентной меди (CuO) и сульфидов, который резко повышает контактные сопротивления. Это приводит к тому, что в течение срока службы затухание гибких кабелей с медными проводниками может увеличиться в 1,5–2 раза. В кабелях с посеребренными проводниками, если конструктивно обеспечены хорошие контакты между проволоками, коэффициент затухания в процессе эксплуатации увеличивается не более чем в 1,3 раза [37].

Биметаллические посеребренные проволоки с сердечником из меди или бронзы получают методами гальванического серебрения или плакирования. Слой серебра, полученный гальванизацией, имеет рыхлую структуру и для его уплотнения обычно вводят операцию волочения после серебрения. Из этих соображений предпочтительнее применение проволок, полученных плакированием. Обычно толщина слоя серебра 3–10 мкм.

Олово также используется для защиты поверхности медных проволок от окисления и улучшения монтажных свойств, но вследствие в 6,5 раз большего, чем у меди, удельного электрического сопротивления, оловянное покрытие вызывает увеличение активного сопротивления проводников и коэффициента затухания. Утонение оловянного покрытия расширяет частотный диапазон применения луженых проводников. Так, переход от обычных способов лужения со снятием излишков олова с помощью протиров или волок к газодинамическому способу [44] позволяет уменьшить толщину слоя с 2–3 до 1 мкм и поднять верхнюю границу применения радиочастотных кабелей с лужеными проводниками с 3 до 10 ГГц (см. рис. 3.17). При газодинамическом лужении излишки расплавленного олова на проволоке сдуваются сверхзвуковой струей горячего инертного газа.

Покрытия из серебра или олова применяются и для защиты поверхности сталемедной биметаллической проволоки. Получающиеся при этом проволоки носят название триметаллических.

Специальные проводниковые материалы. Для защитных покровов радиочастотных кабелей ограниченное применение находит стальная оцинкованная и стальная нержавеющая проволоки и свинец. Свинец используется в качестве влагонепроницаемых оболочек крупногабаритных кабелей, предназначенных для длительной эксплуатации в земле и под водой. В этом случае для повышения механических характеристик свинец имеет присадки сурьмы до 0,8 или меди до 0,08 % [39].

Особо чистый свинец используется для изготовления проводников сверхпроводящих радиочастотных кабелей, так как при гелиевых температурах он становится одним из лучших высокочастотных сверхпроводников. Для этой же цели используются ниобиевые проволоки и ленты из

чистого ниобия или с покрытием из сплава ниобия с оловом (Nb_3Sn). Подробно высокочастотные свойства сверхпроводниковых материалов рассмотрены в [15].

Электрические свойства проводников, применяемых в радиочастотных кабелях, приведены в табл. 4.1. Широкий диапазон температур, в котором работают радиочастотные кабели, требует учета изменения электрического сопротивления проводников. В диапазоне температур $-200 \div +200^\circ\text{C}$ ($73 \div 473\text{ K}$) зависимость имеет линейный характер и описывается общезвестной формулой

$$\rho_T = \rho_{293} [1 + TK\rho(T - 293)], \quad (4.2)$$

где ρ_T — удельное электрическое сопротивление при температуре T ; ρ_{293} — то же при нормальной температуре; $TK\rho$ — температурный коэффициент сопротивления относительно $T = 293\text{ K}$; T — температура проводника, K .

Температурные зависимости удельного электрического сопротивления меди, серебра и алюминия приведены на рис. 4.1 для нормальных условий, установленных ГОСТ 11326.0-78. Ход кривых наглядно показывает эффективность серебрения при повышенных температурах. Напро-

Таблица 4.1. Электрические свойства проводниковых материалов при нормальных условиях [$t = 15 \div 35^\circ\text{C}$, атмосферное давление $84 \div 106\text{ кПа}$ ($630 \div 800\text{ мм рт.ст.}$), относительная влажность 45–80%]

Материал	Удельное электрическое сопротивление, $\mu\text{Ом}\cdot\text{м}$	Температурный коэффициент электрического сопротивления, $1/\text{К}$	Относительная магнитная проницаемость
Медь мягкая	0,0173	0,0042	1
Медь твердая	0,0180	0,0042	1
Серебро мягкое	0,0160	0,0038	1
Серебро твердое	0,0165	0,0038	1
Алюминий мягкий	0,0275	0,0041	1
Алюминий твердый	0,0283	0,0041	1
Олово	0,1140	0,0044	1
Бронза БрХЦрК	0,0200	0,0035	1
Сталь	0,1000*	0,0046	200*
Сталь нержавеющая	0,0750*	0,0045	50*
Никель	0,0684	0,0067	70*
Нихром	1,04–1,15	0,0001	1*
Свинец	0,210	0,0039	1
Ниобий	0,155	0,0036	1

* Значения требуют уточнения для конкретных материалов и условий применения.

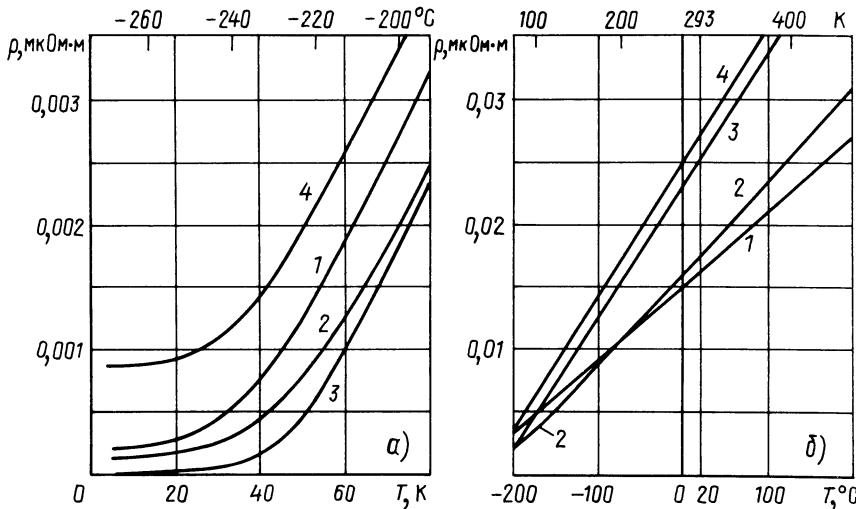


Рис. 4.1. Зависимость удельного электрического сопротивления металлов от температуры [45, 46]:

1 – серебро (чистота 99,8%); 2 – медь М1; 3 – алюминий А999; 4 – алюминий А7

тив, при пониженных температурах [ниже -100°C (173 К)] применение медных материалов в полужестких и полугибких кабелях предпочтительнее [36]. В гибких кабелях посеребренные проводники сохраняют свое преимущество и при низких температурах [37] за счет меньших контактных сопротивлений. Интересно также отметить, что при криогенных температурах, ниже -200°C (73 К), весьма перспективно применение высокочистого алюминия, который превосходит по электропроводности даже медь [45, 46].

По мере понижения температуры амплитуда тепловых колебаний кристаллической решетки металла уменьшается и увеличивается длина свободного пробега электронов проводимости, что приводит к падению электросопротивления. При криогенных температурах колебания решетки настолько ослабляются, что основной механизм электросопротивления отступает на второй план. Существенными становятся столкновения электронов с атомами примесей и дефектами кристаллической структуры. Поскольку концентрация примесей и дефектов от температуры не зависит, кривые электросопротивления меняют свой характер (рис. 4.1, a).

Удельное сопротивление проводника при криогенных температурах (ниже 77 К) можно представить по правилу Матиссена [28] в виде суммы

$$\rho_T = \rho_u(T) + \rho_o,$$

где $\rho_i(T)$ – температурно зависимая часть электросопротивления, обусловленная рассеянием электронов на колебаниях решетки (фононах); ρ_0 – остаточное электросопротивление, представляющее собой сумму влияний всех дефектов решетки и примесей.

Для описания $\rho_i(T)$, которое при охлаждении стремится к нулю, наиболее часто используется выражение Грюнайзена–Блоха [26], дающее хорошее совпадение с экспериментальными результатами. Механические свойства проводников приведены в табл. 4.2. Для радиочастотных кабелей, подвергаемых механическим нагрузкам, механические свойства могут оказаться главенствующими, так как основную нагрузку несут проводники. Решение обычно находят применения композиционные материалы и усиленные конструкции кабелей.

Таблица 4.2. Механические свойства проводниковых материалов при нормальных условиях

Наименование материала	Плотность, $\gamma, 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел гости, МПа	Предел гости, МПа
Медь мягкая	8,89	200–250	15–30	17	123	0,35	20–30	40–70	
Медь твердая	8,89	360–450	0,5–2	17	135	—	200–300	250–350	
Серебро мягкое	10,5	150–180	20–40	19,7	76	0,37	28	35	
Серебро твердое	10,5	250–300	3	19,7	97	—	—	—	
Алюминий мягкий	2,7	60–80	10–25	23,8	68	0,34	24–40	30–50	
Алюминий твердый	2,7	120–170	2–5	23,8	72	—	50–70	95–130	
Олово	7,3	20–40	60–90	23	55	0,4	1,5	—	
Бронза	8,8	430–450	2–5	17	—	—	—	—	
БрХЦрК									
Сталь	7,8	600–750	15–20	11	206	0,28	—	—	
Сталь нержавеющая	7,9	650–700	20–40	15	190	0,3	—	230–260	
Никель	8,85	400–500	35–40	13,3	205	—	80	100	
Нихром	8,40	700	25	13,0	—	—	—	—	
Свинец	11,34	12–20	30–70	29,2	16	0,44	2,0	—	
Ниобий	8,57	320–400	10–15	7,0	110	—	—	—	

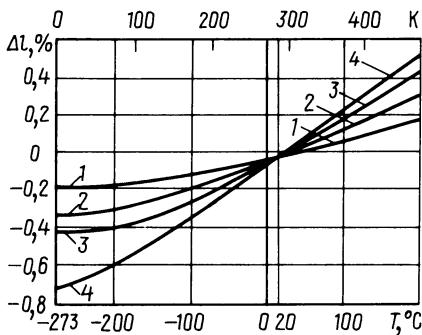


Рис. 4.2 Зависимость степени линейного теплового расширения металлов от температуры [47, 48]:

1 – сталь нержавеющая; 2 – медь; 3 – алюминий; 4 – свинец

Такие свойства, как предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве, характеризуют технологичность металлов. Из табл. 4.2 хорошо видны меньшая прочность и упругость алюминия, которые в сочетании с малой стойкостью к излому и определяют трудности его переработки при малых поперечных сечениях.

Для кабелей, работающих в широком диапазоне температур, немаловажное значение имеет степень линейного теплового расширения [47, 48].

В диапазоне 0–150 °С (273–473 К) это свойство линейно зависит от температуры и может характеризоваться температурным коэффициентом линейного расширения. Чистые металлы сильнее, чем сплавы, изменяют свои размеры с изменением температуры, а среди металлов, ис-

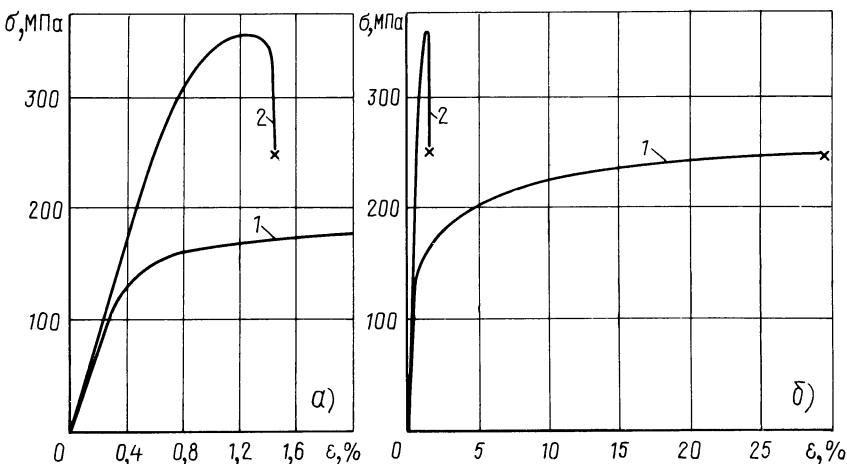


Рис. 4.3. Кривые деформации мягкой медной проволоки диаметром 0,5 мм (1) и твердой диаметром 0,47 мм (2)

пользуемых в радиочастотных кабелях, наибольшие изменения характерны для свинца (рис. 4.2).

Приведенные на рис. 4.3 кривые деформации мягкой и твердой медных проволок наглядно показывают, какие напряжения и относительные удлинения необходимы для формообразования. В мягком материале при относительном удлинении, превосходящем 0,3%, и напряжении, большем 100 МПа, возникают пластические деформации, а следовательно, материал принимает новую форму. В твердом материале пластические деформации выражены слабо и проявляются при напряжении около 300 МПа.

4.2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ И ОБОЛОЧЕК

Полиэтилены различных марок наиболее широко применяются для изоляции и оболочек радиочастотных кабелей. Для изоляции, благодаря высокой технологичности, преимущественное распространение получил полиэтилен низкой плотности, называемый также по основному способу получения полиэтиленом высокого давления. Изредка применяется полиэтилен высокой плотности (низкого давления). Фактически в кабельной промышленности используется не чистый полиэтилен, а композиции полиэтилена, представляющие смесь нескольких партий исходного полиэтилена – для выравнивания их свойств – с добавкой стабилизаторов. Основные физико-механические и технологические свойства полиэтиленовых композиций и система маркообразования даны в ГОСТ 16336-77. Стабилизаторы повышают стойкость полиэтилена к тепловому старению. Полиэтилен поставляется в гранулах матового цвета размером не более 5 мм.

Представляет интерес применение пористого полиэтилена. Плотность пористой полиэтиленовой изоляции примерно в 2 раза меньше, чем сплошной. При сохранении наружных габаритов кабеля замена сплошного полиэтилена на пористый не дает снижения общей массы кабеля, так как для сохранения волнового сопротивления необходимо увеличить диаметр и массу внутреннего проводника. Но применение пористого полиэтилена дает существенное улучшение электрических параметров кабеля: коэффициент затухания уменьшается примерно на 30%, а фазовая скорость увеличивается на 15% за счет увеличения диаметра внутреннего проводника и уменьшения диэлектрической проницаемости изоляции.

Поскольку чистый полиэтилен достаточно быстро стареет на свету и в нем появляются микротрешины, то для защитных оболочек применяются композиции светостабилизированного полиэтилена, содержащего 2% мелкодисперсной сажи. Светостабилизированный полиэтилен имеет черный цвет и также поставляется в гранулах.

Поливинилхлоридный пластикат применяется наряду с полиэтиленом для оболочек радиочастотных кабелей с полиэтиленовой изоляцией.

Его свойства приводятся в ГОСТ 5960-72. При нормальных и повышенных температурах поливинилхлоридный пластикат обеспечивает большую гибкость кабеля, чем полизтилен. Кроме того, он негорюч и выпускается нескольких цветов, что значительно улучшает внешний вид кабеля. Однако при повышенных температурах пластификатор может мигрировать в полизтиленовую изоляцию, значительно увеличивая диэлектрические потери в ней. Этот недостаток устраняется применением специальной 301 рецептуры пластика марки 0-50 с немигрирующим пластификатором. В кабелях, предназначенных для преимущественной эксплуатации при низких температурах или при смене температур, применение поливинилхлоридного пластика нежелательно.

Фторопласти отличаются уникальным сочетанием свойств и применяются как для изоляции, так и для оболочек. Их основные достоинства: отличные электрические свойства, высокая теплостойкость и стойкость

Таблица 4.3. Механические свойства полимерных материалов при нормальных условиях

Наименование материала	Плотность γ , $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости, ГПа
Полизтилен низкой плотности	0,92	12-15	550-600	0,15-0,25
Полизтилен высокой плотности	0,952	22-35	500-700	0,6-0,8
Пористый полизтилен	0,45	3-5	300	-
Светостабилизированный полизтилен	0,924	13-15	550-600	0,3-0,6
Поливинилхлоридный пластикат	1,22-1,34	14-18	250-300	0,5
Фторопласт-4	2,2	14-45	60-200	0,45-0,85
Фторопласт-4Д	2,2	20-25	100-250	0,60-0,90
Фторопласт-4МБ	2,16	17-25	300-350	0,50-0,70
Ленты СКЛ	1,86	8-10	80-90	-
Пористый ПТФЭ	0,8-0,9	10	50-150	-
Фторопласт-4ОШ	1,665	27-50	150	0,80-1,40
Фторопласт-2М	1,75-1,80	40-54	250-400	1-2
Полиимиднофторопластовая пленка	1,54-1,66	90	75	-
Кремнийорганическая резина	1,2	6-8	500-900	-
Полиамид (капрон)	1,14	66	90-200	3

к циклическому воздействию температур, высокая инертность к химическим воздействиям. Из числа изоляционных материалов, применяемых в радиочастотных кабелях, фторопласты (фторополимеры) имеют самые низкие диэлектрические потери в СВЧ-диапазоне. В СССР выпускается широкий ассортимент фторопластовых материалов [49], из которых в радиочастотных кабелях используются: фторопласт-4 в виде строганых ориентированных и неориентированных пленок; фторопласт-4Д и 4ДМ в виде порошка; сырье каландрированные ленты из фторопласта 4Д (СКЛ) и плавкие фторопласти 4МБ, 4ОШ, 2М в виде гранул. К недостаткам фторополимеров следует отнести высокую плотность, дефицитность и высокую стоимость. Свойства фторополимеров достаточно хорошо изучены, в частности, освещены в [50–52].

Таблица 4.4. Эксплуатационно-технологические свойства полиэтиленов, используемых для изоляции радиочастотных кабелей (по ГОСТ 16336-77)

Параметр	Марки композиций полиэтилена низкой плотности				Марки композиций полиэтилена высокой плотности	
	102-01К, 102-02К	107-01К, 107-02К	153-01К, 153-02К	178-01К, 178-02К	204-07К, 204-11К, 204-19К	206-07К, 206-11К, 206-19К
Температура плавления, °C	106–110				125–135	
Максимальная рабочая температура, °C	85				100	
Температура хрупкости, °C, не выше	-120	-100	-120	-100	-(80–150)	
Показатель текучести расплава, г/10 мин	0,24–0,36	1,7–2,3	0,21–0,39	1,05–1,95	0,6–0,9	0,9–1,5
Стойкость к растрескиванию (при 50°C), ч, не менее	500	2,5	500	2,5	100	50
Массовая доля летучих веществ, %, не более	Не нормируется				0,10–0,15	
Число включений, шт., не более	0–5	0–5	3–15	3–15	10–40	10–40
Водопоглощение за 30 сут, %	0,02				0,03–0,04	

Таблица 4.5. Эксплуатационно-технологические свойства полиэтиленов и поливинилхлоридного пластика, используемых для оболочек

Параметр	Марки композиций полиэтилена низкой плотности				Марки поливинилхлоридного пластика		
	102-10К	107-10К	153-10К	178-10К	O40	O50	O55
Температура плавления (ПЭ) или размягчения (ПВХ), °С	106–110				170±10	175±10	170±10
Максимальная рабочая температура, °С	85				70		
Температура хрупкости, °С, не выше	-120	-100	-120	-100	-40	-50	-55
Показатель текучести расплава, г/10 мин	0,24–0,36	1,7–2,3	0,21–0,39	1,05–1,95	—	—	—
Стойкость к растягиванию (при 50°C), ч, не менее	500	2,5	500	2,5	—	—	—
Стойкость к фотокислительному старению, ч, не менее		500			—	—	—
Потери в массе при 160°C в течение 6 ч, %, не более	—	—	—	—	3	3	2,8
Водопоглощение за 24 ч, %			<0,015		0,35	0,30	0,40
Кислородный индекс, %		18			—	—	—

Дублированные полиамидно-фторопластовые пленки отличаются высокой механической прочностью, но на порядок большими диэлектрическими потерями, чем строганые фторопластовые пленки, и находят поэтому ограниченное применение в радиочастотных кабелях.

Кремнийорганическая резина используется для оболочек кабелей с фторопластовой изоляцией, от которых требуется высокая гибкость при нормальных и повышенных температурах. Однако при понижении температуры кремнийорганическая резина быстро теряет эластичность и кабели в оболочке из нее становятся жестче кабелей в оболочке из фторпласта 4МБ.

Теплостойкие нити и лаки. Наибольшую гибкость теплостойких кабелей во всем диапазоне рабочих температур обеспечивают защитные покровы, верхний слой которых выполнен в виде оплетки из теплостойких нитей. Чаще всего для этих целей используется стеклонить, а также оксалоновая и фениловая нити. Для повышения механических свойств оплетки ее пропитывают кремний органическим лаком.

Механические свойства перечисленных полимерных материалов приведены в табл. 4.3, а в табл. 4.4–4.6 – эксплуатационно-технологические. Свойства нитей показаны в табл. 4.7.

Таблица 4.6. Эксплуатационно-технологические свойства фторполимеров

Параметр	Наименование фторполимера			
	Ф4, Ф4Д	Ф4МБ	Ф4ОШ	Ф2М
Температура плавления, °C	327	265–290	260–270	160–180
Максимальная рабочая температура, °C	260	230	155	145
Минимальная рабочая температура, °C	–269	–180	–100	–60
Показатель текучести расплава, г/10 мин	–	1–20	0,1–2,0	1–8
Термостабильность (потеря массы при прогреве), (3 ч, 420°C) %	0,2 (3 ч, 300°C)	0,25 (5 ч, 275°C)	1,2 (5 ч, 275°C)	0,4 (5 ч, 275°C)
Кислородный индекс, %	96	95	31	43
Дугостойкость, с	260–700	160–300	72	50–70
Водопоглощение за 24 ч, %	0,00	0,01	0,1	0,04

Таблица 4.7. Свойства волокнистых материалов

Наименование	Марка или номер	Линейная плотность, кг/1000 м	Настильность, мм	Радиальная толщина оплетки, мм	Тепловое сопротивление*, К·м/Вт	
					Сухая нить	Пропитанная нить
Стеклонить	БС6-6,8×1×2	0,0136	0,7	0,15	9–12	6–8
	БС6-1, 13×1×2	0,026	0,10	0,20		
Фенилоно-вай нить	70	0,143	0,10	0,23	10–14	6–9
	34	0,029	0,22	0,32		
Оксалоно-вай нить	70	0,0143*	0,16	0,23	10–14	6–9
	34	0,029*	0,22	0,32		

* Значения требуют уточнения.

За счет пропитки лаком повышается стойкость оплетки из нитей к истиранию, механическим воздействиям при монтаже кабелей и примерно в 1,5 раза уменьшается тепловое сопротивление оплеток.

Свойства кремнийорганических лаков:

	КО916	КО921
Технологический коэффициент расхода лака	1,25	1,25
Толщина лаковой пленки, мм	0,03–0,05	0,03–0,05
Технологический коэффициент степени высыхания лака	2	2,5

Особо следует остановиться на тепловом расширении полимеров. В диапазоне рабочих температур радиочастотных кабелей упомянутые полимеры претерпевают несколько структурных переходов. Все они содержат как кристаллическую, так и аморфную фазы, которые по-разному реагируют на изменение температуры. В результате сложения разных типов внутримолекулярной подвижности линейные изменения размеров наблюдаются при изменении температуры не более чем на 50 град, поэтому нецелесообразно характеризовать изменения размеров полимеров коэффициентом теплового расширения. Большей информативностью обладает степень линейного теплового расширения (рис. 4.4), которая прямо показывает изменения линейных размеров с изменением температуры. Как видно из рисунка, изменения размеров полимеров значительно превосходят изменения размеров металлов, что при повышенных температурах приводит к большим механическим напряжениям в изоляции и проводниках и даже к нарушениям конструкции кабеля [53]. При пониженных температурах возникают усадки и образуются зазоры, происходит расогласование соединителей.

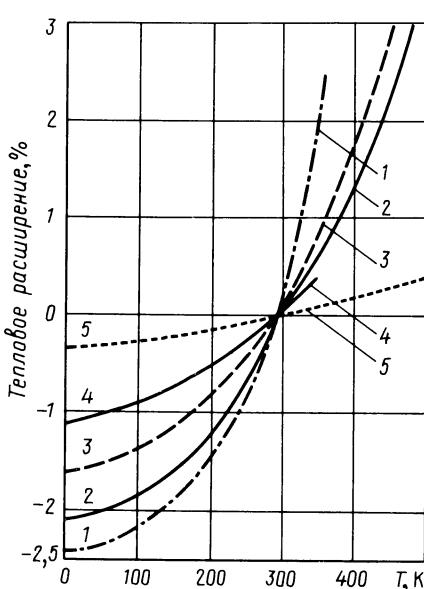


Рис. 4.4. Степень линейного теплового расширения полимеров:

1 – полиэтилен; 2 – политетрафторэтилен; 3 – фторопласт 4МБ; 4 – полиамид; 5 – медь

4.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Поведение полимеров в рабочем диапазоне частот и температур резко отличается от поведения проводниковых материалов, которые в большинстве случаев хорошо описываются соотношениями нормального скин-эффекта и достаточно простыми формулами расчета высокочастотного сопротивления, индуктивности и коэффициента затухания в проводниках. В противоположность этому электрические свойства полимерных материалов, используемых в качестве изоляции радиочастотных кабелей, описываются нелинейными зависимостями как от частоты, так и от температуры.

Сводные данные об электрических свойствах изоляционных материалов радиочастотных кабелей приведены в табл. 4.8, причем по диэлектрическим потерям указаны значения, характерные для диапазона СВЧ.

Таблица 4.8. Электрические и тепловые свойства изоляционных материалов при нормальных условиях

Наименование материала	Относительная диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность, кВ/мм	Тепловое сопротивление, К·м/Вт
Полистилен низкой плотности	2,28	$(3,5-5) \cdot 10^{-4}$	30–60	3–4
Полистилен высокой плотности	2,33	$3 \cdot 10^{-4}$	30–60	3–4
Пористый полиэтилен	1,65	$(3-8,5) \cdot 10^{-4}$	15–20	9
Светостабилизированный полиэтилен	2,40	$5 \cdot 10^{-4}$	15	3–3,5
Поливинилхлоридный пластикат	3,40	$6 \cdot 10^{-2}$	18–40	5–7
Фторопласт-4	2,02	$2 \cdot 10^{-4}$	20–100	5–8
Фторопласт-4Д	2,05	$3 \cdot 10^{-4}$	20–40	4–5
Фторопласт-4МБ	2,10	$(6-8) \cdot 10^{-4}$	20–50	4
Ленты СКЛ	1,75	$1 \cdot 10^{-4}$	20–30	6–8
Пористый ПТФЭ	1,2–1,4	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	10–25	10–12*
Фторопласт-4ОШ	2,60	$1 \cdot 10^{-2} *$	20	4,3–4,5
Фторопласт-2М	3,0*	$(7-12) \cdot 10^{-2} *$	10	4,5–8,5
Поликарбонатно-фторопластовая пленка	2,8–3,0	$4 \cdot 10^{-3} *$	100–150	4–5
Кремнийорганическая резина	3,0–3,5	$(1-3) \cdot 10^{-2}$	15–40	5–7
Полиамид (капрон)	3,1*	$2 \cdot 10^{-2} *$	20–50	3–4
Воздух	1,00055	0	4–5	34–28

* Значения требуют уточнения.

Здесь же приводятся сведения по тепловым сопротивлениям, которые необходимы для расчетов допустимой мощности на входе.

В переменном электрическом поле ($10^1 < f < 10^{11}$ Гц) изменение поляризованности диэлектрика во времени отстает по фазе от изменения напряженности электрического поля и отличается от равновесного значения, соответствующего постоянному полю [54]. Это обуславливает зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (дисперсию), а также наличие диэлектрических потерь – необратимое превращение части электромагнитной энергии в тепло. Свойства диэлектрика в синусоидальном переменном поле характеризуются комплексной относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'', \quad (4.3)$$

где ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость; ϵ'' – коэффициент диэлектрических потерь.

В переменном поле оптического диапазона ($10^{11} < f < 2 \cdot 10^{16}$ Гц) свойства диэлектрика также характеризуются комплексной относительной диэлектрической проницаемостью, но для описания зависимости ϵ от частоты и свойств вещества используются физические модели атомно-молекулярного взаимодействия.

Действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ϵ' показывает, во сколько раз большее количество энергии запасается в конденсаторе при замене вакуума данным диэлектриком и зависит, как показано выше, от поляризованности диэлектрика. Мнимая часть ϵ'' пропорциональна мощности, рассеиваемой в единице объема. В переменном электромагнитном поле в диэлектрике возникает сдвиг фаз между вектором электрического смещения D и напряженностью электрического поля E , который описывается тангенсом угла диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'. \quad (4.4)$$

Это свойство интересует нас в наибольшей степени, так как $\operatorname{tg}\delta$, во-первых, определяет потери в изоляции кабеля, а во-вторых, подвержен значительным изменениям. Зачастую эти изменения достигают двух-трех порядков. Для современных радиочастотных кабелей наиболее существенны температурно-частотные изменения. В связи с постоянным ростом требований и необходимости прогнозировать параметры радиочастотных кабелей при любых эксплуатационных воздействиях требуется самое детальное знание потерь в используемой температурно-частотной области.

В зависимости от того, обладают молекулы диэлектрика постоянным дипольным моментом или нет, их делят на полярные и неполярные. Иногда еще выделяют группу слабополярных диэлектриков. Среди рассматриваемых материалов к неполярным относятся полиэтилен и политетрафторэтилен благодаря симметричности строения молекул. Не-

большая несимметричность макромолекул фторопласта 4МБ приводит к появлению очень слабого дипольного момента, поэтому данный материал относится к слабополярным. Остальные материалы – полярные.

Относительная диэлектрическая проницаемость неполярных и слабополярных диэлектриков определяется только электронной и ионной поляризацией. В диэлектрическую проницаемость полярных диэлектриков, кроме того, значительный вклад вносит дипольная поляризация.

Исследования диэлектрических потерь показали, что во всех материалах, в том числе и неполярных, имеют место релаксационные потери. Они связаны с наличием постоянных диполей, полярных примесей, низкомолекулярных фракций и нарушениями симметрии макромолекул. Величина дипольного момента и концентрация дипольных молекул и примесей (при прочих равных условиях) определяют величину дипольных потерь, а наивероятнейшее время релаксации определяет зависимость от температуры и частоты.

Резонансные диэлектрические потери также имеют место во всех полимерах. Максимумы резонансных потерь наблюдаются в инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) областях электромагнитных волн. Полосы поглощения связаны с рассеянием энергии при резонансных колебаниях: в ИК-спектре – ионов, а в УФ-спектре – электронов.

Диэлектрическая проницаемость неполярных полимеров практически не имеет частотной зависимости в диапазоне от 0 до 10^{11} Гц из-за очень малой концентрации диполей. Так, максимуму диэлектрических потерь ПТФЭ марки "тэфлон" с $\operatorname{tg}\delta_{\max} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ соответствует частотная дисперсия ϵ' всего на 0,0026, т.е. около 0,1% номинального значения [56].

Температурные изменения диэлектрической проницаемости неполярных диэлектриков связаны с температурными изменениями плотности. Если не происходит изменения фазового состояния диэлектрика, то изменения диэлектрической проницаемости составляют 4–6%, причем они будут одинаковыми в диапазонах низких, высоких и сверхвысоких частот. С такими изменениями уже нельзя не считаться. Особо значительные изменения плотности и диэлектрической проницаемости наблюдаются при температурах фазовых переходов (рис. 4.5).

Температурный ход ϵ' неполярных полимеров может быть определен с помощью формулы Клаузиуса–Мосотти [54, 55] и связан, как уже указывалось, с изменением плотности материала:

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} = \frac{Na}{3\epsilon_0} = \frac{N(a_3 + a_i)}{3\epsilon_0}, \quad (4.5)$$

где N – число молекул в единице объема, изменяющееся с температурой; a – суммарная наведенная поляризуемость молекулы, состоящая из электронной (a_3) и ионной (a_i) поляризуемостей; ϵ_0 – электрическая постоянная.

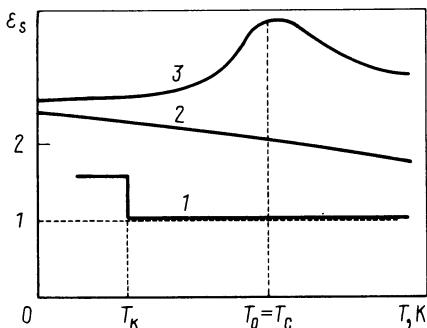


Рис. 4.5. Схематическая зависимость диэлектрической проницаемости неполярных и полярных диэлектриков от температуры в постоянном поле:
1 – криогенные газ и жидкость (T_k – температура кипения); 2 – неполярный твердый диэлектрик; 3 – полярный твердый диэлектрик (T_c – температура стеклования)

При исследованиях полимеров под N обычно понимается число мономерных звеньев в единице объема, а под α – поляризумость мономерного звена. Поскольку в полимерах имеет место большое разнообразие составляющих полимер макромолекул, значения N и α могут быть определены только приближенно. Формула (4.5) была нами использована в другой записи, которая позволяет отказаться от определения N и α . Если известно значение ϵ' при какой-либо температуре (желательно при нормальной), то

$$\frac{\epsilon'_{293} - 1}{\epsilon'_{293} + 2} = p_{уд}, \quad (4.6)$$

где $p_{уд}$ – удельная поляризация, т.е. поляризуемость единицы объема при 293 К.

Изменение температуры сказывается на изменении плотности полимера за счет изменения объема. Последнее учитывается введением сомножителя $[1 + k_l(T)]$, где $k_l(T)$ – степень линейного теплового расширения или сжатия относительно нормальных условий, которая при температурах меньших 293 К имеет отрицательные значения, а выше 293 К – положительные:

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon'(T) - 1}{\epsilon'(T) + 2} &= \frac{p_{уд}}{[1 + k_l(T)]^3} \quad \text{или} \\ \epsilon'(T) &= \frac{[1 + k_l(T)]^3 + 2p_{уд}}{[1 + k_l(T)]^3 + p_{уд}} = \frac{\nu_{уд}(T) - 2p_{уд}}{\nu_{уд}(T) - p_{уд}}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где $\nu_{уд}(T)$ – температурная зависимость удельного объема исследуемого материала, который равен единице при условиях определения $p_{уд}$ ($\nu_{уд} = 1$ при $T = 293$ К).

Таким образом, для получения зависимости $\epsilon'(T)$ необходимо знать температурные изменения линейных размеров или удельного объема исследуемого материала.

Возможен и второй вариант формулы, выраженной через ϵ_{293} :

$$\epsilon'(T) = \frac{(\epsilon_{293} + 2)[1 + k_l(T)]^3 + 2(\epsilon_{293} - 1)}{(\epsilon_{293} + 2)[1 + k_l(T)]^3 - (\epsilon_{293} - 1)}. \quad (4.8)$$

Учитывая, что значение k_l не превышает $\pm 3\%$ в рабочем диапазоне температур радиочастотных кабелей, сомножитель $[1 + k_l(T)]^3$ может быть заменен на $[1 + 3k_l(T)]$ для большинства практических случаев, при этом формула (4.8) приобретает вид

$$\epsilon'(T) = \frac{(\epsilon_{293} + 2)k_l(T) + \epsilon_{293}}{(\epsilon_{293} + 2)k_l(T) + 1}. \quad (4.9)$$

По формуле (4.8) произведен расчет температурной зависимости диэлектрической проницаемости политетрафторэтилена (ПТФЭ), сополимера тетрафторэтилена с гексафтторпропиленом (ФЭП) и полиэтилена низкой плотности (ПЭ) (см. рис. 4.6–4.8). Данные по изменению размеров указанных материалов взяты по рис. 4.4.

Из рисунка видно, что фторполимеры имеют меньшие абсолютные изменения ϵ' по сравнению с полиэтиленом. Температурный коэффициент

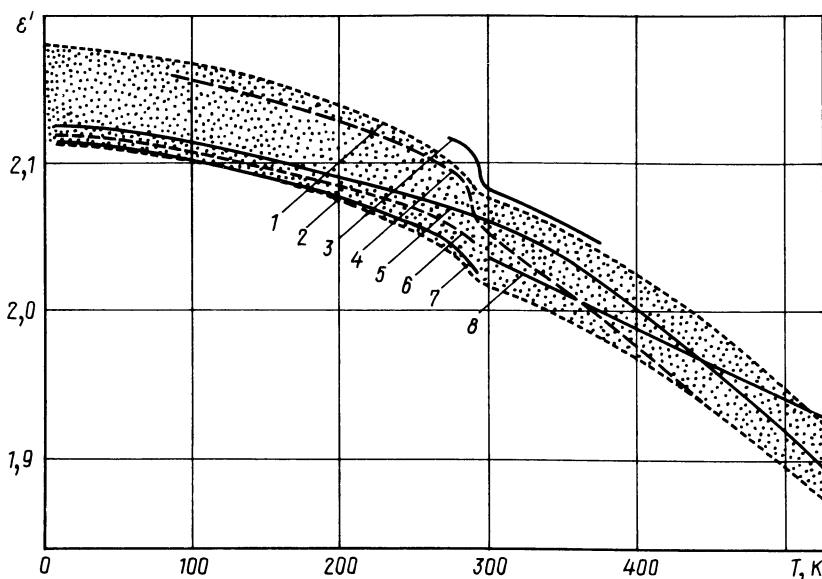


Рис. 4.6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости политетрафторэтилена:

1 – верхняя расчетная граница ($\epsilon'_{293} = 2,08$); 2 – нижняя расчетная граница ($\epsilon'_{293} = 2,02$); 3 – [58]; 4 – [56]; 5 – [59]; 6 – [60]; 7 – [61]; 8 – [62]

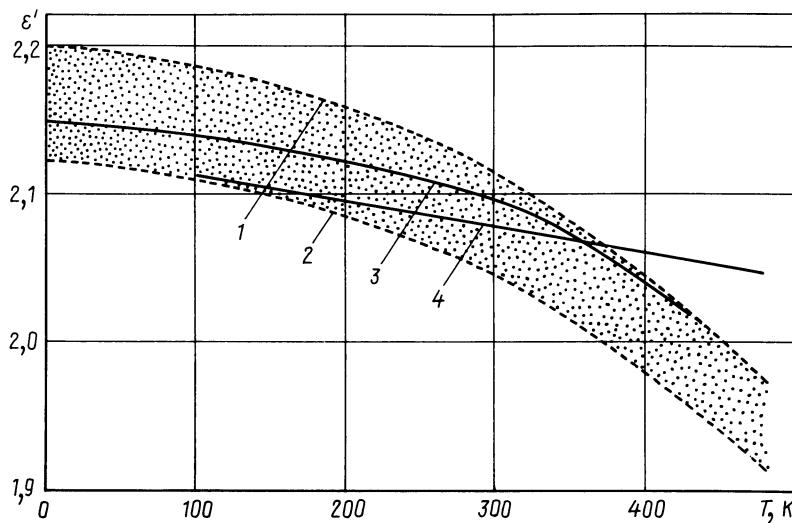


Рис. 4.7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости фторопластика-4МВ и его аналогов: 1 – верхняя расчетная граница ($\epsilon'_{293} = 2,12$); 2 – нижняя расчетная граница ($\epsilon'_{293} = 2,05$); 3 – [59]; 4 – [66]

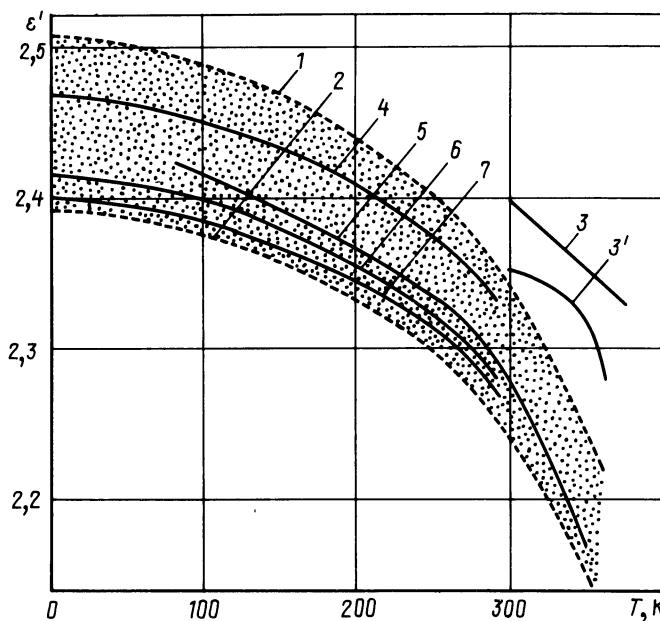


Рис. 4.8. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости полиэтилена:
1 – верхняя расчетная граница ($\epsilon'_{293} = 2,35$); 2 – нижняя расчетная граница ($\epsilon'_{293} = 2,25$); 3, 3' – [58]; 4 – 204–07К [61]; 5 – [66]; 6 – 102–02К [61]; 7 – 107–02К [61]

диэлектрической проницаемости $T\kappa\epsilon$ в среднем составляет: $4,6 \cdot 10^{-4}$ 1/K для ПТФЭ и ФЭП и $7,5 \cdot 10^{-4}$ 1/K для ПЭ. Интересно отметить, что зависимости для ФЭП и ПЭ имеют плавный характер, а зависимость для ПТФЭ характеризуется скачкообразным изменением ϵ' в диапазоне $19\text{--}22^\circ\text{C}$ ($292\text{--}295\text{ K}$), что связано с известной перестройкой кристаллической структуры полимера. Все три зависимости имеют $d\epsilon'/dT < 0$ и отличаются увеличением $T\kappa\epsilon$ по мере повышения температуры.

Материалы от образца к образцу различаются значением диэлектрической проницаемости при нормальных условиях. Полагая изменения их линейных размеров с температурой одинаковыми, получим расчетную область изменения диэлектрической проницаемости с температурой. На рис. 4.6–4.8 показаны также опубликованные экспериментальные результаты для ПТФЭ, ФЭП и ПЭ в сопоставлении с расчетными областями изменения диэлектрической проницаемости. Сравнение кривых показывает их большое сходство и говорит о применимости формул (4.7)–(4.9) во всем рассматриваемом диапазоне температур.

Расчеты зависимости $\epsilon'(T)$ неполярных полимеров по предложенной методике могут быть выполнены, например, с помощью программируемого микрокалькулятора и зачастую предпочтительнее прямых экспериментов. Последнее связано с тем, что линейные измерения по определению $k_l(T)$ по крайней мере на порядок превосходят по точности методы определения диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая проницаемость полярных полимеров. В полярных диэлектриках¹ также имеют место электронная и ионная поляризации, которые дают вклад в ϵ' на уровне 2–2,5. Но кроме того, существенную добавку дает дипольная поляризация, и значение относительной диэлектрической проницаемости полярных полимеров обычно больше или равно 3. Для расчета температурного хода диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков используется формула (4.10), аналогичная (4.5), но учитывающая дипольную поляризацию [54, 55]:

$$\frac{\epsilon'(T) - 1}{\epsilon'(T) + 2} = \frac{N}{3\epsilon_0} \left\{ \frac{\alpha_3 + \alpha_{ii}}{[1 + k_l(T)]^3} + \frac{p^2}{3kT} \right\} = \\ = \frac{\epsilon_\infty(T) - 1}{\epsilon_\infty(T) + 2} + \frac{Np^2}{9\epsilon_0 k T}, \quad (4.10)$$

где ϵ_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость; p – постоянный дипольный момент полярной молекулы; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Температурные зависимости ϵ' полярных полимеров, как видно из рис. 4.9, имеют максимум. В точке максимума доля дипольной поляризации наибольшая. При снижении температуры происходит падение ϵ' до значений 2,3–2,6. Дальнейшее охлаждение мало влияет на изменение ϵ' . Такой вид зависимостей связан с потерей дипольными группами под-

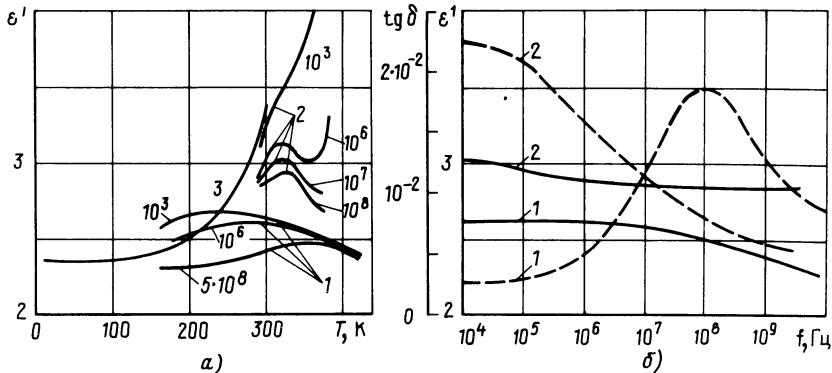


Рис. 4.9. Зависимость диэлектрической проницаемости и $\operatorname{tg} \delta$ полярных полимеров от температуры (а) и частоты (б):

1 – сополимер ТФЭ+Э – аналог Ф-4ОШ [64]; 2 – поливинилхлорид [65]; 3 – полiamид [66]; — ϵ' ; - - - $\operatorname{tg} \delta$

важности. Важно отметить, что диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков все же превосходит значения неполярных даже при гелиевых температурах [63].

При сопоставлении рис. 4.6–4.8 и 4.9 видно характерное различие полярного и неполярного полимеров. У полярных диэлектрическая проницаемость при частотах не выше 10^{11} Гц имеет максимум на температурной зависимости. Зависимости ϵ' от температуры неполярных полимеров имеют вид наклонных кривых с $d\epsilon'/dT < 0$.

Диэлектрическая проницаемость полярных полимеров имеет также и частотную зависимость. Повышение частоты приводит к уменьшению доли дипольной поляризации и соответствующему уменьшению диэлектрической проницаемости (рис. 4.9, б), так как из ориентационного процесса выбывают самые малоподвижные диполи. Области частотной дисперсии ϵ' соответствуют максимум потерь (рис. 4.9, б).

Механизмы диэлектрических потерь. Значение диэлектрических потерь наиболее часто характеризуется значением тангенса угла диэлектрических потерь — $\operatorname{tg} \delta$. Этот параметр чувствителен к химическому и физическому строению диэлектрика, к концентрации дипольных групп и воздействию окружающей среды, в том числе и температуры.

В наиболее освоенных диапазонах частот ($10^7 \div 1,5 \cdot 10^{10}$ Гц) и температур ($-60 \div +200^\circ\text{C}$), характерных для радиочастотных кабелей, диэлектрические потери в полимерах носят дипольный (релаксационный) характер.

Вклад резонансных механизмов может оказаться достаточно значительным только в диапазоне $10^9 \div 10^{11}$ Гц, по соседству с которым находятся полосы инфракрасного поглощения. Весьма показателен в этом смысле рис. 4.10, на котором представлена зависимость $\operatorname{tg} \delta$ ПТФЭ для

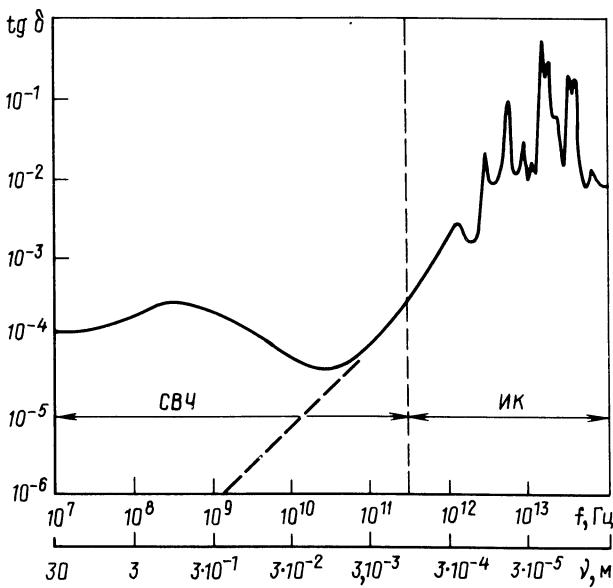


Рис. 4.10. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ политетрафторэтилена от частоты в диапазоне СВЧ- и ИК-излучения ($T = 293$ К):

— полная величина; - - - доля резонансных потерь при СВЧ

частот 10^7 – 10^{14} Гц. Высота максимумов $\operatorname{tg} \delta$ в инфракрасном диапазоне весьма внушительна, но резонансные потери быстро спадают с уменьшением частоты (пунктирная линия на рис. 4.10), поэтому при нормальных температурах и частотах не выше 10^{11} Гц они полностью затушевываются дипольными потерями.

Температурно-частотные рельефы $\operatorname{tg} \delta$. Результаты экспериментальных исследований диэлектрических потерь полимеров обычно представляются в виде зависимостей $\operatorname{tg} \delta$ от частоты или температуры в табличной или графической форме. Зависимости такого типа могут быть представлены также в виде одномерных матриц.

Для конструкторов и исследователей радиочастотных кабелей большое значение имеют методы концентрации, анализа, хранения и обработки экспериментальных данных по $\operatorname{tg} \delta$ полимеров. Традиционные методы представления информации оказались слишком громоздкими, ненаглядными и малоинформационными. В частности, они не позволяют одновременно использовать и температурные, и частотные зависимости, критически сопоставлять данные разных авторов и отбрасывать ненадежные результаты. Затруднено получение промежуточных значений методом интерполяции. Значительно лучше указанной цели служат температурно-частотные диаграммы $\operatorname{tg} \delta$. По существу, температурно-частотная

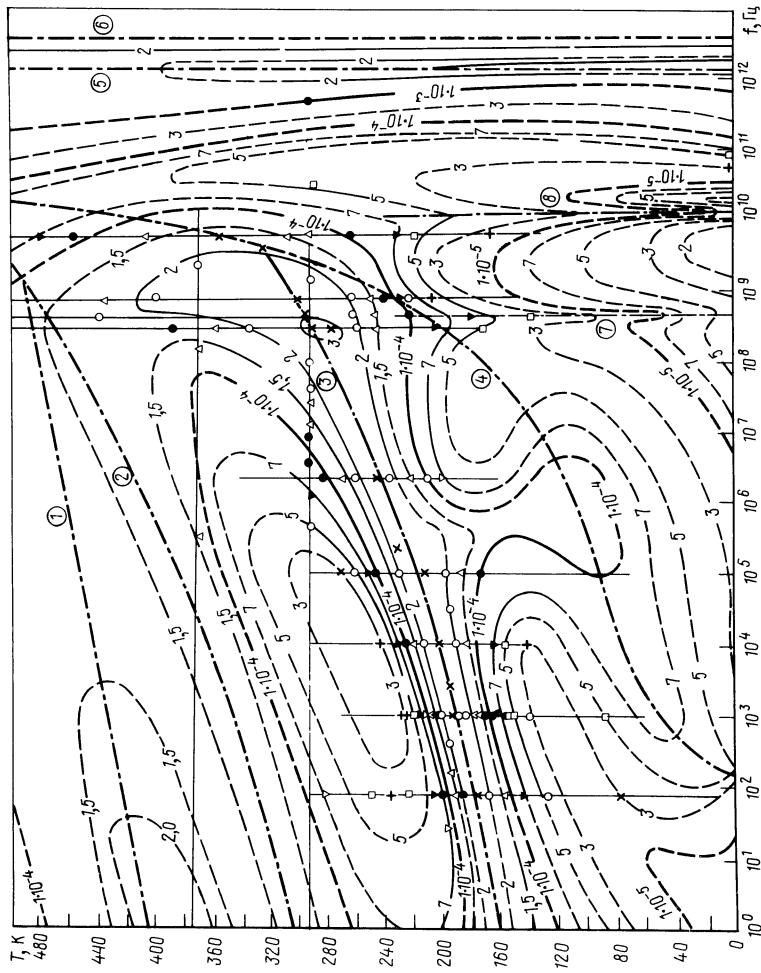


Рис. 4.11. Рельеф $\operatorname{tg} \delta$ политетрафторэтилена:

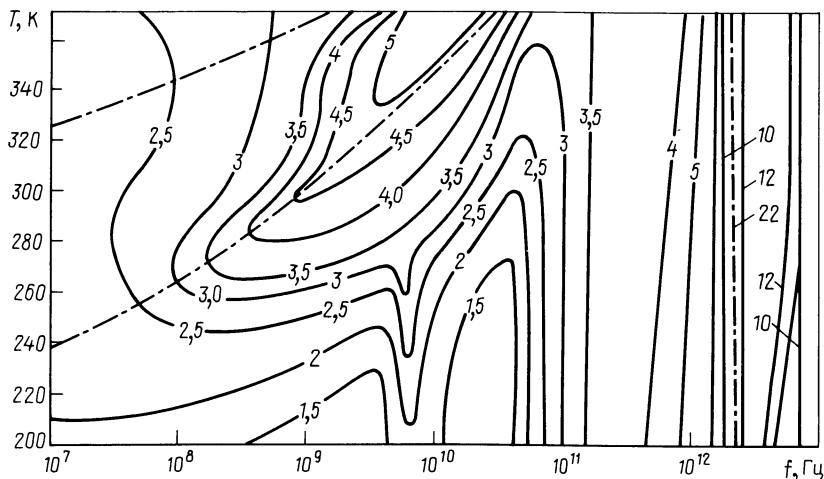


Рис. 4.12. Рельеф $\operatorname{tg} \delta$ полиэтилена:

— линии максимумов; — линии равных значений $\operatorname{tg} \delta$

диаграмма – это рельеф $\operatorname{tg} \delta$, построенный с помощью горизонталей равных значений, т.е. один из вариантов трехмерного графика.

Метод представления данных в такой форме известен достаточно давно [54], однако он не получил широкого распространения, как показал опыт, из-за недостатка накопленного экспериментального материала.

На рис. 4.11 и 4.12 показаны рельефы $\operatorname{tg} \delta$, построенные для политетрафторэтилена и полиэтилена низкой плотности на основании опубликованных данных и экспериментальных результатов авторов [67].

При построении этих графиков предложен и применен новый прием, заключающийся в том, что предварительно наносятся линии Аррениуса, которые в принятом масштабе изображаются в виде кривых в области действия дипольных механизмов и в виде прямых вертикальных линий в области действия резонансных и туннельных механизмов. Затем наносятся экспериментальные данные по принятой шкале горизонталей [54].

Соединение экспериментальных точек производится плавными линиями таким образом, что за основу берется положение кривых Аррениуса. Наличие двух-трех кривых служит хорошей базой для привязки разнородных экспериментальных данных. Линии максимумов на рельефах $\operatorname{tg} \delta$ можно уподобить линиям хребтов на географических картах. Положение такого хребта определяет область действия данного механизма потерь.

На рис. 4.11 и 4.12 отчетливо видны области действия обычных дипольных механизмов, области ИК-поглощения, переходная область, лежащая в интервале $3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$ Гц. Линии "хребтов" показывают протяженность влияния отдельных дипольных групп и области их "слияния".

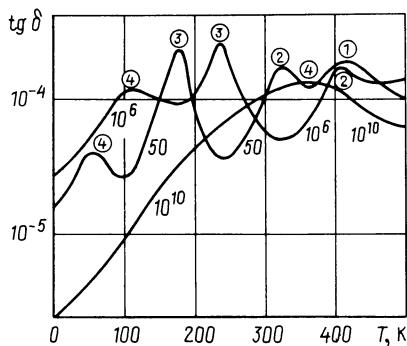


Рис. 4.13. Температурные сечения рельефа $\operatorname{tg} \delta$ ПТФЭ на частотах 50, 10^6 , 10^{10} Гц. (Цифры в кружках около максимумов соответствуют номерам линий Аррениуса.)

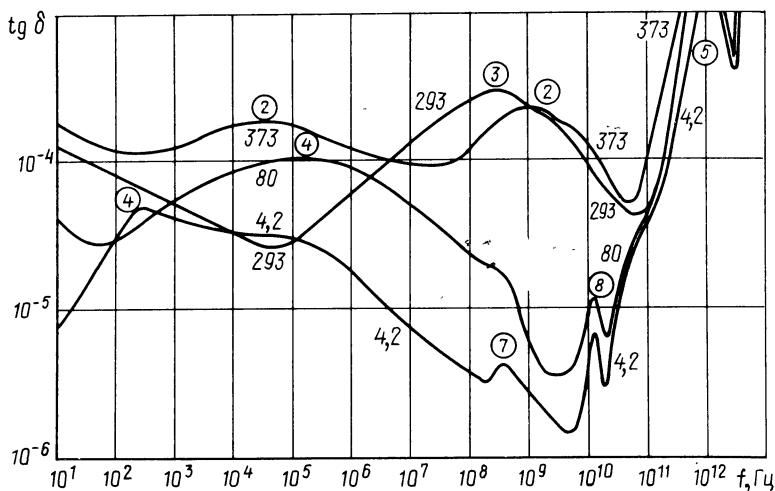


Рис. 4.14. Частотные сечения рельефа $\operatorname{tg} \delta$ ПТФЭ при температурах 373, 293, 80, 4,2 К. (Цифры в кружках около максимумов соответствуют номерам линий Аррениуса.)

В дополнение к рельефам могут быть построены температурные (рис. 4.13) и частотные (рис. 4.14) сечения и проанализированы традиционными методами. На рис. 4.14 и 4.10 видно, насколько поглощение в ИК-области превышает поглощение, связанное с поворотами диполей.

Диэлектрические потери при частотах выше 15 ГГц исследованы очень слабо, поэтому результаты работ [61, 68] могут оказать существенную помощь при разработке радиочастотных кабелей. Были измерены $\operatorname{tg} \delta$ фторопласта-4 и полиэтиленов марок: 102-02К, 107-02К, 204-07К, 178-01К, 153-01К в диапазоне частот 16–38 ГГц и при температурах 4,2–300 К.

Явной частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ указанных материалов при нормальной температуре не обнаружено, однако средний уровень потерь существенно зависит от марки материала. Наименьшие потери характерны для полиэтиленов 102-02К и 204-07К на уровне $1,5 \cdot 10^{-4}$. Несколько большая величина потерь, но также не превосходящая $2 \cdot 10^{-4}$, у фторопласта-4 и полиэтилена 107-02К. Наибольшими потерями с $\operatorname{tg} \delta = (4 \div 5) \cdot 10^{-4}$ отличаются полиэтилены 178-01К и 153-01К (рис. 4.15).

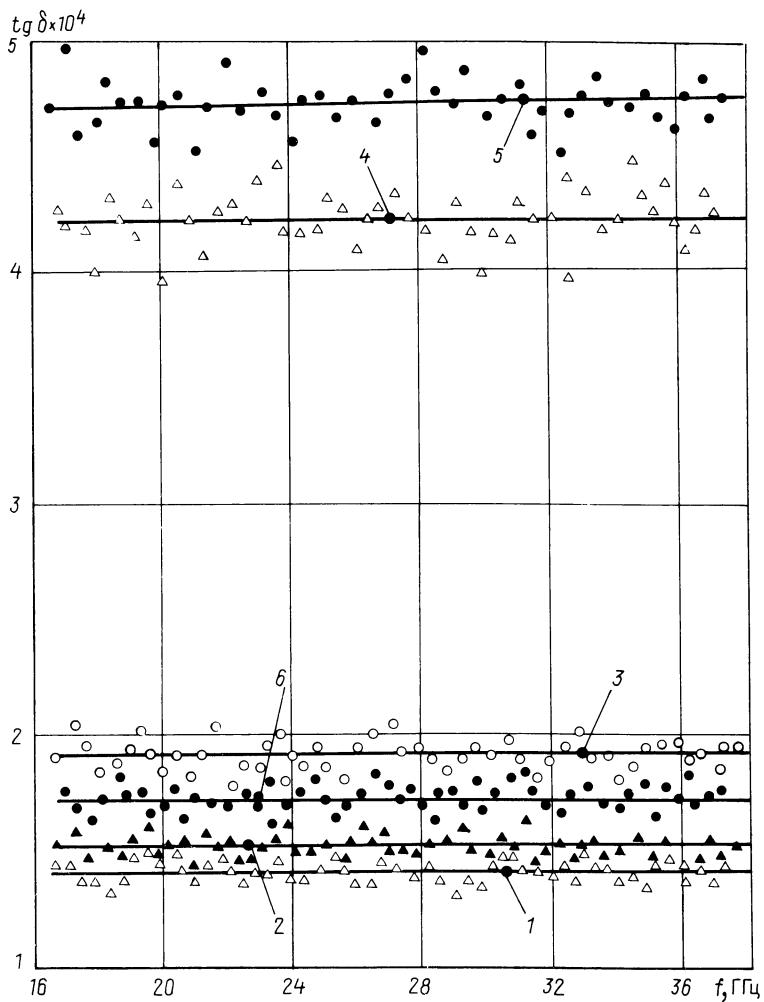


Рис. 4.15. Частотная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ полиэтиленов марок 102-02К (1), 204-07К (2), 107-02 (3), 178-01 (4), 153-01 (5) и фторопласта-4 (6) при температуре 293 К

Температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ указанных материалов при частоте около 35 ГГц показаны на рис. 4.16. Охлаждение приводит к заметному (более чем в 10 раз) снижению потерь, что соответствует теоретическим моделям, рассмотренным выше. Снижение диэлектрических потерь происходит неравномерно. Можно выделить три области 300-200К, 200-50К

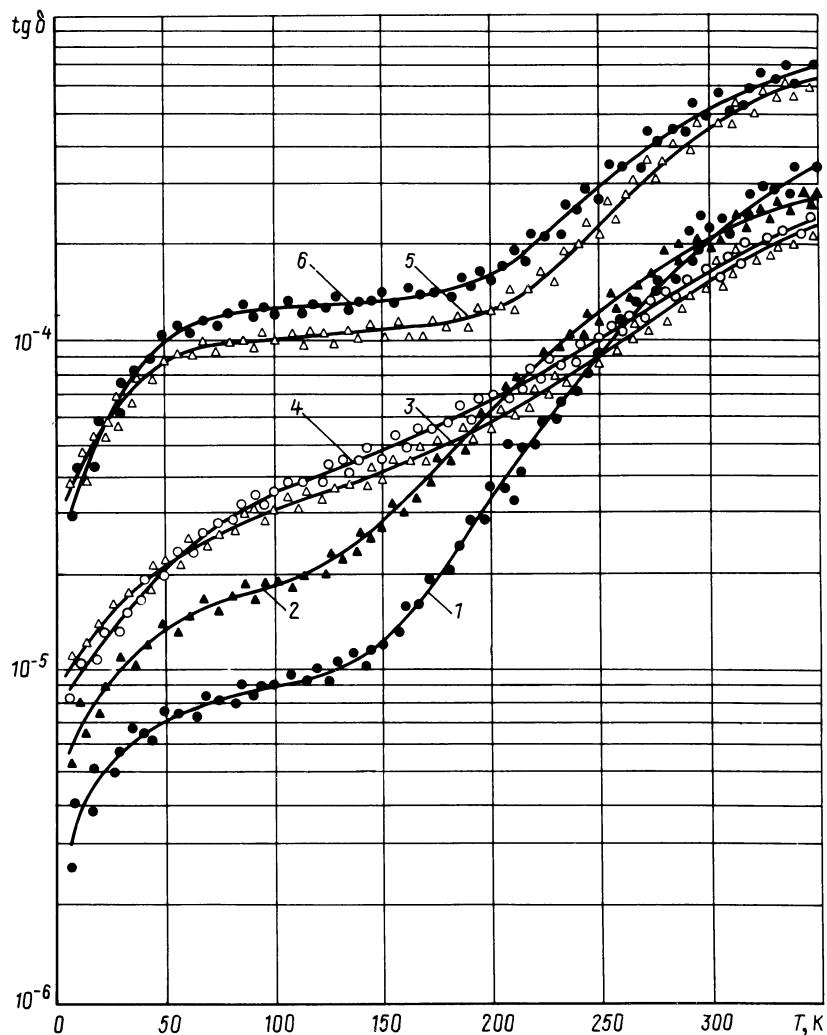


Рис. 4.16. Температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ фторопласта-4 (34, 62 ГГц) (1) и полиэтиленов марок 107-02К (34, 47 ГГц) (2), 102-02К (34, 51 ГГц) (3), 204-07К (34, 40 ГГц) (4), 178-01К (34, 93 ГГц) (5), 153-01К (34, 91 ГГц) (6)

и 50-4К. Резкое снижение потерь имеет место в первой и третьей областях, во второй области снижение незначительно. В первой области происходит вымораживание диполей, максимум подвижности которых находится на нормальные температуры. Дальнейшее поведение кривых вызвано влиянием небольших диполей с малой энергией активации и максимумом потерь около 120 К. Только охлаждение ниже 50 К позволяет уменьшить влияние этих высокоподвижных диполей. Подобные явления наблюдаются и при более низких частотах, как это видно из рис. 4.13.

ГЛАВА 5

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Конструкция кабельного изделия существенно зависит от примененных технологических процессов. Характеристики технологических процессов определяют такие важные параметры радиочастотных кабелей, как допустимые отклонения волнового сопротивления, коэффициент отражения, коэффициент затухания, стабильность коэффициента фазы, строительная длина.

Каждый технологический процесс обладает специфическими особенностями, из которых нас в наибольшей степени интересуют определяющие стабильность конструктивных параметров. В идеальном коаксиальном радиочастотном кабеле внутренний и внешний проводники должны иметь форму идеальных круговых цилиндров, соосных по всей длине. Поверхности внутреннего и внутренняя поверхность внешнего проводников должны быть идеально гладкими и без загрязнений. Изоляция также должна иметь форму идеального цилиндра, соприкасающегося по всей длине с обоими проводниками без каких-либо зазоров. Обеспечить получение кабеля идеальной конструкции невозможно, но нас интересует степень отклонения от идеала, связанная с конкретным технологическим процессом.

При производстве радиочастотных кабелей применяются разнообразные технологические процессы [69], которые могут быть разделены на два типа. Первые связаны с получением и обработкой собственно кабельных изделий, полуфабрикатов и материалов, имеющих длинномерную форму, таких, как проволока, кабели, ленты, сердечники и т.п. Вторые связаны с получением и обработкой исходных материалов, таких, как резины, лаки, супензии, электролиты, полимеры. Рассмотрим классификацию процессов только первого типа [70]. Она может быть проведена в двух аспектах:

- 1) по типу взаимодействия технологического узла с кабелем;

2) по основному результату воздействия.

По типу в зависимости технологические процессы разделены на поступательные и сосредоточенные.

Поступательными называются процессы последовательной обработки кабеля (длинномерного изделия) на небольшом отрезке его длины, связанные с перемещением кабеля относительно технологического узла.

Средоточенными называются процессы обработки кабеля при отсутствии его перемещения относительно технологического узла.

Следующим классификационным уровнем предусматривается деление поступательных и сосредоточенных процессов на подвиды. Это деление базируется на делении конструктивных элементов кабелей на линей-

Таблица 5.1. Формы конструктивных элементов кабельных изделий

Конструктивный элемент	Линейная форма	Сpirальная форма
Внутренний проводник	1. Проволока круглая, моно-металлическая или многослойная 2. Трубка, в том числе с кольцевым гофром	1. Скрученный из круглых проволок 2. Трубчатый внутренний проводник, например, из прямогольных проволок с опорной спиралью
Изоляция	3. Сплошная монолитная или пористая 4. Шайбовая, колпачковая или баллонная 5. С продольными шлицами или каналами 6. Порошковая (например, магнезиальная)	3. Спиральная обмотка из лент, нитей 4. Спиральная обмотка кордэлем (круглым, прямогольным, фигурным)
Внешний проводник	7. Металлическая трубка гладкая или с кольцевым гофром (в том числе сварная) 8. Гладкая или гофрированная лента или проволоки, наложенные продольно	5. Металлическая трубка со спиральным гофром (в том числе сварная) 6. Оплетка проволокой 7. Обмотка металлическими или металлизированными лентами, спиральный повив проволок 8. Волнообразный повив проволок
Оболочка, защитное покрытие	9. Слой лака, серебра, олова, никеля 10. Сплошная оболочка	9. Обмотка лентами 10. Оплетка нитями или проволокой

ные и спиральные, смысл которого ясен из табл. 5.1. В соответствии с этим принципом линейными или спиральными называются процессы изготовления линейных или спиральных конструктивных элементов.

Изготовление спиральных элементов может осуществляться в процессе непрерывных (трубка со спиральным гофром, волнообразный повив проволок) или периодических процессов (спиральный повив проволок, оплетка). Поэтому спиральные процессы, в свою очередь, разделены на два соответствующих подвида.

Сосредоточенные процессы также разделены на два подвида: повсеместные и локальные. Повсеместными мы называем процессы обработки кабеля сразу на всей длине, например отжиг проволоки в шахтной печи. Помимо повсеместных может быть выделен и небольшой подвид локальных процессов, при осуществлении которых воздействие на кабель производится в отдельных местах, например армирование кабелей соединителями и муфтами, сращивание и заделка концов и т.д.

Классификация процессов по типу взаимодействия показана на рис. 5.1.

По основному результату воздействия и поступательные, и сосредоточенные процессы разделены на четыре наиболее характерные группы:

- 1) редукции размеров;
- 2) нанесения и соединения;
- 3) преобразования фазового состояния;
- 4) заготовительно-испытательные.

Такие процессы *редукции*, как волочение, прокатка и плющение, резка рулона на ленту, относятся к поступательным линейным. Скалывование катанки и изоляции и гофрирование трубок реализуются в виде линейных или спиральных непрерывных процессов. (Последние с по-

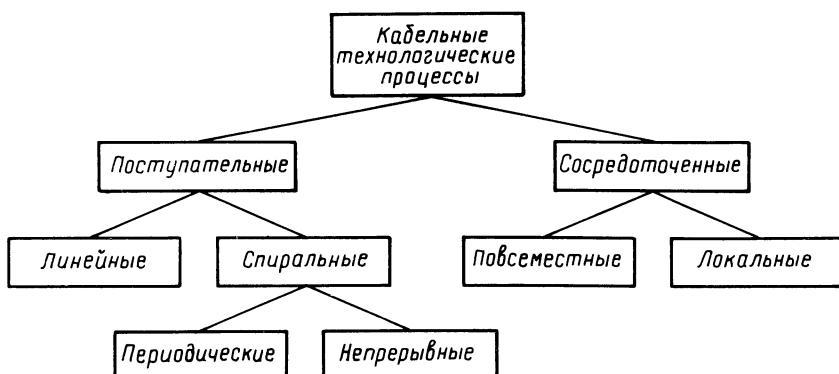


Рис. 5.1. Классификация кабельных технологических процессов по типу взаимодействия с кабелем

мощью вращающегося инструмента). Электрохимическая очистка проводников осуществляется либо на проход в ходе линейных процессов, либо "в завес" в виде сосредоточенного повсеместного процесса. Такие операции, как завальцовка, острение и зачистка концов, являются локальными.

Линейные процессы *нанесения и соединения* объединяют экструзию всех видов, лакировку, электрохимическое осаждение, продольное формирование оболочек из лент и трошение. В то же время пропитка и электрохимическое осаждение могут выполняться и в ходе повсеместных процессов. Экструзия спиральных элементов и волнообразные (S-Z) скрутка и наложение повивов относятся к непрерывным спиральным процессам.

Периодические спиральные процессы объединяют многообразные варианты скрутки, обмотки и оплетки. Заделка концов, срачивание длин, ремонт изоляции, армирование кабеля соединителями и муфтами относятся к локальным процессам соединения.

Преобразование фазового состояния, связанное с отжигом, термообработкой и вулканизацией, реализуется либо в виде линейных, либо повсеместных процессов.

Перемотки и поступательные испытания – это линейные *заготовительно-испытательные* процессы, которые имеют повсеместные аналоги в случае испытаний давлением или напряжением в воде. К повсеместным также относятся комплектация заготовок и транспортировка бухт, катушек и барабанов. В случае выборочных измерений размеров мы имеем дело с локальными испытаниями.

Процессы преобразования фазового состояния и редукции размеров могут быть объединены в одну группу, так как при редукции размеров происходит хотя бы частичное изменение фазового состояния. Однако мы их разделили, учитывая сложившиеся традиции.

На основе приведенных соображений построена двухспектная классификационная таблица технологических процессов, в ячейки которой занесены типовые процессы [70].

Сопоставление поступательных и сосредоточенных процессов. Специалист по кабельной технике, даже не имеющий большого опыта, легко заметит, что из указанных процессов наиболее распространены поступательные, чему причиной является характерная черта любых, в том числе радиочастотных кабелей – длинномерность. Сосредоточенные процессы имеют меньшее распространение, так как они не обеспечивают постоянства воздействия на всей длине кабеля, что приводит к заметным колебаниям свойств кабеля. Сосредоточенные процессы используются в тех случаях, когда реализация поступательного процесса встречает большие технические трудности, например при отжиге проволоки крупных размеров и при ограниченных объемах производства. В последнем случае они обеспечивают экономию производственных площадей по сравнению с поступательными процессами.

Так, 24-ходовая печь для отжига проволок на проход имеет отдающие и тягово-приемные устройства на 24 катушки и печь с 24 каналами. Общая площадь, занимаемая этой установкой, почти в десять раз больше площади, занимаемой шахтной печью, при одинаковой сменной производительности. Но при этом в шахтной печи принципиально нельзя избежать неравномерного обогрева по объему и по виткам проволоки, а следовательно, обеспечить однородность свойств по длине. С учетом сказанного проволоку, отожженную в шахтной печи, не рекомендуется применять в ответственных изделиях.

Проигрывая по занимаемой площади, поступательные процессы выигрывают в простоте системы управления, легко поддающейся автоматизации. На упоминавшейся печи для отжига на проход достаточно поддерживать постоянными температуру в печи и линейную скорость проволоки. В противоположность этому в шахтной печи на начальной и конечной стадиях процесса температура должна соответственно повышаться и понижаться с учетом достигнутого вакуума. Отмеченная особенность поступательного процесса позволяет достаточно просто автоматизировать управление технологической линией и понизить требования к квалификации рабочих.

Особо следует выделить линейные поступательные процессы, обеспечивающие производство кабельных изделий с наивысшими скоростями, например, на экструзионных линиях. Современная техника благодаря накопителям, сдвоенным откатчикам и приемникам, трубопроводному транспорту материалов, автоматизированным системам управления процессом создает возможность изготовления практически бесконечных длин. Остановки необходимы только для отдыха персонала и ремонта оборудования.

В то же время обширная группа поступательных процессов, в том числе линейных, носит ярко выраженный циклический характер, связанный с необходимостью дозаправки материалами и полуфабрикатами или необходимостью снятия готового изделия. В циклических процессах нельзя не считаться с моментами пуска и останова, при которых меняется режим обработки. Характерным примером поступательных циклических процессов может служить плунжерное прессование.

Для кабельной техники характерна тенденция замены сосредоточенных процессов на поступательные. Все больше отжиг, вулканизация, термообработка в печах и котлах заменяются на одноименные поступательные процессы. Это позволяет увеличить стабильность параметров кабелей по длине, повторяемость от длины к длине, при одновременном повышении производительности. В ближайшие годы следует ожидать повсеместной замены испытаний на образцах и с концов на поступательные (на проход) испытательные процессы, встроенные в технологическую линию; причем получаемая информация будет использоваться не только для разбраковки продукции, сколько для управления процессом изготовления.

Однако ряд сосредоточенных процессов не может быть заменен на поступательные (например, термообработка крупногабаритных кабелей, процесс транспортировки барабанов, некоторые виды испытаний, процессы обработки и армирования концов кабелей). Останутся сосредоточенные процессы и в экономически оправданных случаях.

Из определений и краткой характеристики поступательных и сосредоточенных процессов следует, что каждый из них требует своего подхода при анализе и усовершенствовании конкретных технологий. Для каждого вида процессов, по-видимому, характерны свои уровни точности и стабильности параметров, свои нормативы расхода материалов, трудозатрат, отходов.

Одним из основных путей повышения производительности труда и качества является создание поточных линий, т.е. объединение нескольких технологических операций в единую совокупность. В обычной технологической линии по окончании одной какой-либо операции, например экструзии полиэтиленовой изоляции, заготовку необходимо переместить на последующую операцию, например наложение внешнего проводника со сваркой и гофрированием. Следовательно, между двумя поступательными операциями вклинивается транспортирование кабеля на таре (на барабане или в бухте). Требуется также производить проверку и комплектацию проволок и лент перед скруткой и обмоткой соответственно. Транспортировка и комплектация весьма нежелательны, так как служат источником повреждений и резко отличаются по ритму от поступательных процессов. Объединение отдельных технологических операций в поточную линию позволяет отказаться от одной или нескольких транспортных операций, сохранить ритм процесса и повысить качество.

Начали применяться поточные линии и в производстве радиочастотных кабелей. Они предназначены для объединения операций продольного наложения внешних проводников (из фольги, дублированных лент, проволок) и оболочек. Наиболее современные из них оснащаются системами непрерывного контроля и прогнозирования размеров, технологических и электрических параметров.

В современных поточных линиях прослеживается устойчивая тенденция объединения операций по признаку непрерывности, т.е. линейные объединяются с линейными или непрерывными спиральными, а периодические спиральные между собой [70].

Особенности поступательных и сосредоточенных процессов, совместимость непрерывных и циклических необходимо учитывать при создании новых производств и совершенствовании существующих; при выборе процесса, обеспечивающего требуемые точность изготовления изделий, стабильность параметров, строительную длину. Вопрос образования строительных и технологических длин в связи с применяемым технологическим процессом и оборудованием рассмотрен в следующем параграфе.

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЛИН КАБЕЛЕЙ

Технологический процесс изготовления кабельных изделий, как правило, сопряжен с получением отрезков кабеля случайной длины и образованием отходов материалов.

Сложный многооперационный технологический процесс может быть разбит на элементарные. Каждый элементарный технологический процесс представляет собой действие над исходными материалами и полуфабрикатами, например скрутка жилы, изолирование, перемотка с контролем качества и т.д. В результате технологического процесса из исходных материалов и полуфабрикатов производится новый полуфабрикат или готовое кабельное изделие и образуются отходы [71].

В каждом технологическом процессе существуют причины, приводящие к дроблению кабельного изделия на отрезки и образованию отходов. К необходимости разрезания кабеля приводит образование дефектных мест, нарушающих постоянство свойств кабеля по длине: связка жил, прогары и другие дефекты изоляции, выходы размеров за пределы допусков и т.д. Однаковые дефекты образуются, как правило, по одной и той же причине, например, связка жил образуется из-за конечной вместимости тары, отклонения размеров изоляции за пределы допусков – из-за нестабильности процесса изолирования и т.д.

Факторы, приводящие к дроблению кабелей на отрезки, могут быть условно разбиты на два типа: случайные и систематические.

К случайным факторам относятся качество и характеристики исходных материалов и полуфабрикатов, нестабильность технологического процесса и др.

Степень влияния случайных факторов поддается уменьшению путем настройки оборудования, уточнения и оптимизации технологических режимов, применения более качественных материалов.

К систематическим факторам относятся причины, связанные с особенностями циклических технологических процессов и технологического оборудования: конечная вместимость приемной и отдающей тары, вместимость бункеров или цилиндров плунжерных прессов, габариты оборудования или помещения и т.д. Систематические факторы являются неотъемлемым свойством оборудования и не могут быть устраниены без существенного изменения самого оборудования.

Дефекты можно условно разделить на протяженные и локальные. Локальными будем называть дефекты, устранение которых приводит к образованию пренебрежимо малого количества отходов в месте дефекта. Остальные дефекты будем называть протяженными.

Введем еще два понятия: отходы, которые образуются из-за устранения дефектов, порожденных каким-либо фактором, будем называть факторными отходами; отходы материалов или полуфабрикатов, которые обусловлены самой схемой операции, будем называть операционными отходами. К операционным относятся например, отходы, связанные

ные с обрезанием краев металлической ленты перед продольной сваркой оболочек кабелей или с уменьшением диаметра при калибровке изоляции.

Следует заметить, что подавляющее большинство кабельных изделий производится с малыми операционными отходами. Основную долю составляют факторные отходы.

Модель образования отрезков кабельных изделий и отходов. Схема образования отрезков кабелей или полуфабрикатов в технологическом процессе показана на рис. 5.2. Положение дефектов, вызванных каждым из отдельных факторов, определяется значением координаты x . Будем полагать, что кабельное изделие имеет единственное измерение – длину. За начало отсчета примем начало первого полуфабриката.

Количественной характеристикой воздействующего фактора является интенсивность появления вызываемых им дефектов. Характеристикой фактора также может служить среднее расстояние между соседними дефектами. Интенсивность дефектов λ есть отношение числа дефектов n к длине изделия l , т.е.

$$\lambda = n/l. \quad (5.1)$$

Если среднее расстояние между дефектами обозначить \bar{x} , то

$$\bar{x} = 1/\lambda = l/n.$$

Если какой-то фактор порождает n протяженных дефектов со средней длиной l_d , то длина полуфабриката, которая поступит в отходы, будет $l_{\text{отх}} = nl_d$, а относительная длина отходов

$$l_{\text{отх}}/l = nl_d/l = l_d \lambda. \quad (5.2)$$

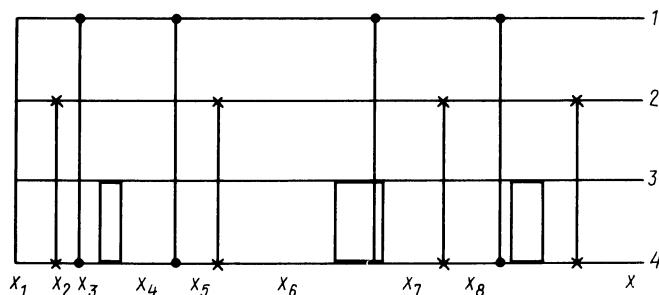


Рис. 5.2. Схема образования отрезков кабеля (полуфабриката) в технологическом процессе:

1 – координаты дефектов на исходном полуфабрикате (фактор 1); 2 – координаты локальных дефектов, образовавшихся в ходе процесса (фактор 2); 3 – координаты протяженных дефектов, образовавшихся в ходе процесса (фактор 3); 4 – координаты дефектов на кабеле (или полуфабрикате), полученном в результате выполнения данного процесса

Предположим следующее:

- 1) дефекты от каждого из факторов возникают случайным образом, а число факторов достаточно велико (в этом случае можно считать, что положение любого из дефектов на оси x не зависит от положения соседних дефектов);
- 2) вероятность появления дефектов на заданном отрезке зависит только от длины этого отрезка;
- 3) вероятность появления одного дефекта на малом отрезке приближенно пропорциональна длине этого отрезка, а вероятность появления двух или более дефектов пренебрежимо мала.

Эти предположения соответствуют свойствам простейшего потока событий, понятие которого используется в теории массового обслуживания [72].

Расстояния между дефектами в этом случае подчиняются экспоненциальному закону распределения плотности вероятностей [72, 73]

$$p(x) = \lambda e^{-\lambda x}. \quad (5.3)$$

Математическое ожидание или среднее расстояние между дефектами для (5.3) равняется $1/\lambda$.

Если интенсивности отдельных дефектов какого-либо вида обозначить λ_i , то суммарная интенсивность будет равна сумме средних интенсивностей каждого из дефектов:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (5.4)$$

Отметим, что $p(x)dx$ описывает относительное число отрезков в достаточно большой партии кабелей с длинами от x до $x + dx$.

На практике полезно знать, какое относительное количество отрезков кабеля длиной $X \leq x$ следует ожидать в партии. Это значение характеризует функция распределения числа отрезков

$$F(x) = \int_0^x p(x)dx = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x}dx = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (5.5)$$

Число отрезков N , имеющих длину $X \leq x$, в партии кабелей общей длиной L можно оценить по формуле

$$N(X \leq x) = L \lambda F(x). \quad (5.6)$$

Чтобы определить, какую суммарную длину будут иметь отрезки длиной от x до $x + \Delta x$, используется понятие плотности вероятности длин отрезков:

$$q(x) = Ax\lambda e^{-\lambda x},$$

где $q(x)$ — суммарная относительная длина отрезков, каждый из кото-

рых имеет длину x ; A – коэффициент, который можно определить из условия

$$\int_0^{\infty} q(x) dx = 1,$$

откуда $A = \lambda$. Тогда

$$q(x) = \lambda^2 x e^{-\lambda x}. \quad (5.7)$$

Соответствующая функция распределения суммарной длины отрезков $X \leq x$

$$\Phi(x) = \int_0^x \lambda^2 x e^{-\lambda x} dx = 1 - (1 + \lambda x) e^{-\lambda x}. \quad (5.8)$$

С помощью данной функции можно оценить суммарную длину s отрезков кабелей короче x :

$$s(X \leq x) = L\Phi(x), \quad (5.9)$$

где L – общая длина всех отрезков (длина партии кабелей).

Если партия кабелей комплектуется только отрезками, равными или большими, чем строительная длина, то распределение длин бездефектных отрезков в такой партии будет подчиняться усеченному экспоненциальному закону.

Для выборки длин, больших x_1 , получим следующие распределения вероятностей:

$$p_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1; \\ \lambda e^{-\lambda(x-x_1)} & \text{при } x \geq x_1; \end{cases} \quad (5.10)$$

$$F_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1; \\ 1 - e^{-\lambda(x-x_1)} & \text{при } x \geq x_1; \end{cases} \quad (5.11)$$

$$q_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_1; \\ \frac{\lambda^2 x e^{-\lambda(x-x_1)}}{\lambda x_1 + 1} & \text{при } x \geq x_1; \end{cases} \quad (5.12)$$

$$\Phi_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1; \\ 1 + \frac{1 + \lambda x}{1 + \lambda x_1} e^{-\lambda(x-x_1)} & \text{при } x \geq x_1. \end{cases} \quad (5.13)$$

В качестве иллюстрации справедливости полученных законов распределения на рис. 5.3 приведены экспериментальные данные для партии

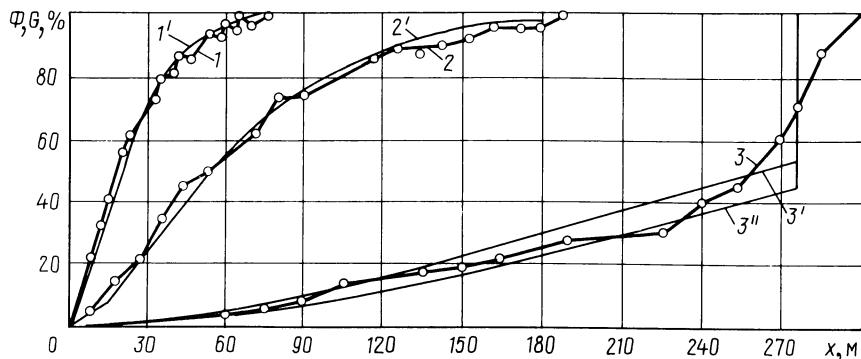


Рис. 5.3. Функции распределения длин радиочастотного кабеля в оплётке:

—○— — экспериментальные значения; — — расчетные значения; 1 — готовый кабель после наложения защитной оболочки; 1' — расчет $[\Phi(x)]$ для $\bar{x}=12$ м; 2 — заготовка после наложения оплётки; 2' — расчет $[\Phi(x)]$ для $\bar{x}=33$ м; 3 — изолированный внутренний проводник [расчет $G(x)$ для: $a=275$ м; 3' — $\bar{x}=350$ м; 3'' — $\bar{x}=450$ м]

радиочастотного кабеля в оплётке (кривые 1 и 2):

$$\Phi_3(x) = \sum_{j=1}^M x_j / L, \quad (5.14)$$

где $\sum x_j$ — суммарная длина отрезков кабеля, которые короче x_1 ; L — общая длина всех отрезков в партии; M — число отрезков кабеля в партии.

На том же рисунке построены расчетные значения $\Phi(x)$ по формуле (5.8) — кривые 1' и 2'.

Иллюстрацией возможных отклонений от экспоненциального закона может служить кривая 3 на рис. 5.3.

В данной технологической операции присутствует систематический фактор с интенсивностью, превосходящей интенсивность всех случайных факторов. Заготовка кабеля изолируется на плунжерном прессе, и максимальная ее длина ограничена вместимостью цилиндра пресса. После полного выпрессовывания таблетки из фторопласта-4Д заготовка разрезается и производится загрузка новой таблетки.

Рассмотрим упрощенную модель технологического процесса с сильным систематическим фактором. Пусть все случайные факторы, кроме сильного систематического, подчиняются экспоненциальному закону с интенсивностью λ , а сильный фактор приводит к рассеканию кабеля через одинаковые расстояния a . Тогда, используя свойства экспоненциального закона распределения [73], можно определить вероятность

появления дефектов на отрезке длиной a :

$$p_a(n) = \frac{(\lambda a)^n}{n!} e^{-\lambda a}, \quad (5.15)$$

где $p_a(n)$ – вероятность появления n дефектов на отрезке длиной a .

Если бы технология была бездефектной, то в партии длиной L было бы получено $N = L/a$ отрезков кабелей. Из-за того что существуют случайные факторы, приводящие к появлению дефектов, некоторые (или все) отрезки оказываются рассечеными на более мелкие части. Отрезки с одним дефектом рассекаются на две части, с двумя – на три и т.д. Если предположить, что каждый из дефектов распределен равновероятно на отрезке a_i , то плотность вероятности числа отрезков, получающихся в результате дробления отрезка a , будет подчиняться закону

$$p_n(x) = A(a - x)^n - 1. \quad (5.16)$$

Суммарно распределение длин всех рассеченных отрезков

$$qa(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda a)^n}{n!} e^{-\lambda a} \frac{n(n+1)}{a(n+1)} x(a-x)^{n-1}. \quad (5.17)$$

После преобразований

$$qa(x) = \begin{cases} \lambda^2 x e^{-\lambda x} + \frac{(2-x)}{a} \lambda x e^{-\lambda x} & \text{при } x \leq a; \\ 0 & \text{при } x > a; \end{cases} \quad (5.18)$$

$$G(x) = \begin{cases} 1 - [1 + \lambda x(1 - x/a)] e^{-\lambda x} & \text{при } x < a; \\ 1 & \text{при } x \geq a. \end{cases} \quad (5.19)$$

Следовательно, $G(x)$ полностью удовлетворяет требованиям к функции распределения. В соответствии с формулой (5.19) относительная длина нерассеченных отрезков длиной a равна

$$p_a(n=0) = \frac{(\lambda a)^0}{0!} e^{-\lambda a} = e^{-\lambda a}. \quad (5.20)$$

Функция $G(x)$ имеет тот же смысл, что и функция $\Phi(x)$, но учитывает наличие систематического фактора, приводящего к разрезанию кабеля через одинаковые расстояния a .

Следовательно, для кривой \mathcal{Z} (рис. 5.3) можно подобрать такие параметры $\bar{x} = 1/\lambda$ и a , что теоретическая кривая $G(x)$ будет максимально приближена к экспериментальной. Такие кривые для $a = 275$ м; $\bar{x} = 350$ и 450 м построены на этом же рис. 5.3. Как видно из рисунка, теоретические и экспериментальные кривые практически совпадают. Основное

различие между ними наблюдается при $x \approx a$, поскольку в данном случае $\tilde{a} = a + \Delta$.

Случайное значение Δ распределено по гауссовскому (нормальному) закону со среднеквадратическим $\sigma = 10 \div 15$ м и нулевым средним.

На рис. 5.4 приведены экспериментальные функции распределения длин $\Phi_3(x)$ кабеля со сварными проводниками для выборок, превосходящих строительную длину 50 м. Даны также расчетные функции $\Phi_1(x)$, параметр λ для которых подобран из условия минимального отклонения $\Phi_1(x)$ от $\Phi_3(x)$. На основании найденного значения λ рассчитана функция $\Phi(x)$, характеризующая полную выборку (рис. 5.4, кривая 3).

Сравнивая экспериментальное распределение партии кабелей по длинам с теоретическим можно устанавливать, например, фактическое число полученных маломеров, даже если из данной партии эти маломеры изъяты при предъявлении на контроль.

Используя имеющиеся результаты, можно разработать модели "дефектности" основных технологических процессов. В [71] это сделано на примере процессов червячной и плунжерной экструзии и обмотки лентами.

Мерные длины. Полученные результаты представляют интерес и для потребителей кабелей. Предположим, что кабельное изделие выпуска-

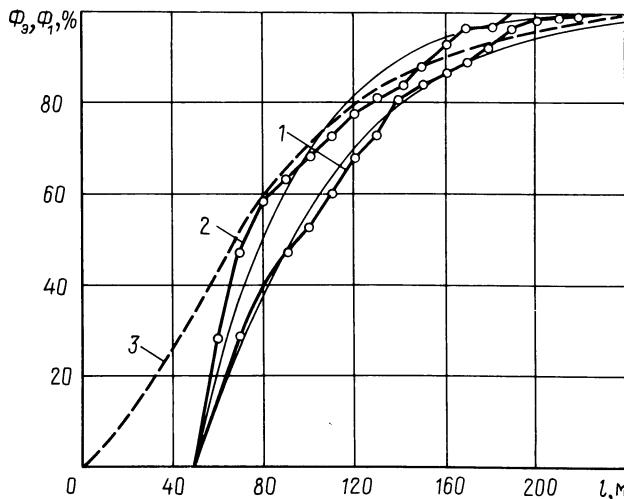


Рис. 5.4. Функции распределения длин кабеля со сварным внешним проводником. Выборка длин, превышающих строительную длину $x_1 = 50$ м:

—○—○— экспериментальные значения (Φ_3); ———— расчетные значения; 1 — выборка из партии, выпущенной в июле [расчет $\Phi_1(x)$ для $x_1 = 50$ м, $\bar{x} = 40$ м]; 2 — выборка из партии, выпущенной в ноябре [расчет $\Phi_1(x)$ для $x_1 = 50$ м, $\bar{x} = 30$ м]; 3 — восстановленная полная выборка (расчет)

ется длинами, распределенными по закону $\Phi(x)$ с параметром λ , а потребитель использует кабель отрезками одинаковой длины x_0 . В этом случае кабели длиной $x < x_0$ непригодны для применения. Из кабелей длиной $x_0 < x < 2x_0$ можно изготовить по одному отрезку длиной x_0 , из кабелей длиной $2x_0 < x < 3x_0$ – по два отрезка и т.д. Число кабелей длиной $x_0 < x < 2x_0$ в партии будет равно

$$n_1 = M[F(2x_0) - F(x_0)] = L\lambda[F(2x_0) - F(x_0)], \quad (5.21)$$

где M – общее число кусков кабелей в партии длиной L . Число кабелей длиной $2x_0 < x < 3x_0$ равно

$$n_2 = L\lambda[F(3x_0) - F(2x_0)] \quad (5.22)$$

и т.д.

Суммарная относительная длина мерных отрезков ($0 \leq q_m \leq 1$) будет равна

$$\begin{aligned} q_m &= n_1 x_0 / L + n_2 x_0 2/L + \dots + n_k k x_0 / L = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i x_0 [F(x_0(i+1)) - F(x_0 i)]. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Относительная длина отходов кабеля, оставшихся после раскрова,

$$q_{отх} = 1 - q_m. \quad (5.24)$$

. На рис. 5.5 приведена расчетная зависимость относительной длины мерных отрезков кабеля от отношения мерной и средней технологической длины в партии кабеля.

Как следует из рисунка, при длине мерного отрезка, равной средней длине кабелей в партии, т.е. при $x_0/\bar{x} = 1$, будет использовано 58% общей длины кабелей, а при $x_0/\bar{x} = 2$ только 31%. Используя формулу (5.23)

или рис. 5.5, можно рассчитывать требуемый объем заказываемой партии кабелей и прогнозировать количество обрезков, остающихся после раскрова.

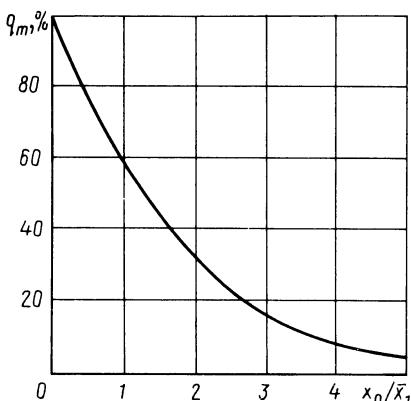


Рис. 5.5. Доля мерных отрезков длиной x_0/\bar{x} , нарезанных из партии кабелей с длинами, подчиняющимися экспонциальному закону со средней длиной \bar{x}

Подобные расчеты могут служить основой для комплектации и распределения партий кабелей потребителям, использующим кабели отрезками разных длин.

Распределение кабельных изделий и полуфабрикатов по длинам чрезвычайно чувствительно ко всем дефектам, возникающим в ходе изготовления кабелей. В этом смысле длины могут служить эффективным критерием для оценки качества технологических процессов и управления им.

5.3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ПРОВОДНИКОВ

Расчет параметров скрутки. Скрутка используется главным образом для изготовления гибких внутренних проводников радиочастотных кабелей. Гибкие внешние проводники в виде спирального повива круглых или плоских проволок также выполняются методом скрутки.

Для внутренних проводников с целью обеспечить наибольшую однородность электромагнитного поля используются конструкции правильной скрутки. Наибольшее распространение получили две из них: 1 + 6 и 1 + 6 + 12, выполненные из проволок одинакового диаметра.

Вывод параметров, характеризующих скрученные конструкции, дан в [3,69]. Особо следует отметить монографию [74], в которой всесторонне рассмотрена теория скрутки.

Расчет режимов скрутки рекомендуется производить в следующей последовательности. По результатам расчета электрических параметров известен расчетный диаметр внутреннего проводника d_1 . Исходя из требований к гибкости задается число проволок; в кабелях обычной гибкости – семь проволок, в кабелях повышенной гибкости – 19 и более проволок. Диаметр отдельных проволок определяется по формуле

$$d_{\text{пр}} = d_1 / (2k - 1), \quad (5.25)$$

где k – число повивов. Необходимо обратить внимание, что согласно (5.25) центральная проволока – это первый повив, шесть проволок – второй и 12 – третий и т.д.

В кабельной технике применяются стандартизованные конструкции скрученных проводников, поэтому результаты расчетов необходимо соопасовать с требованиями ГОСТ 22483-77 (СТ СЭВ 3466-81). Отступления допускаются только в крайнем случае. Так, в кабеле РК 75-1-22 применена нестандартная конструкция – 7×0,07 мм. В случае, если стандартизованный скрученный проводник имеет размер, не совпадающий с требованиями электрических параметров, необходимо произвести корректировку конструкции кабеля за счет диаметра по изоляции или диэлектрической проницаемости.

Шаг скрутки рассчитывается исходя из заданной кратности и уточняется в соответствии с реальной матрицей шагов крутильной машины:

$$h = md_1, \quad (2.56)$$

где h – шаг скрутки; m – практическая кратность шага скрутки, принимаемая равной 14–16 для наружных повивов и 18–20 для внутренних. Для кабелей с повышенными требованиями по гибкости кратность шага может быть уменьшена.

Пример расчета шагов скрутки внутреннего проводника:

Схема скрутки	1 + 6	1 + 6 + 12
-------------------------	-------	------------

		1 + 6
--	--	-------

Конструкция	7×0,15	19×0,15	7×0,25
-----------------------	--------	---------	--------

Диаметр проводника,	
---------------------	--

мм.	0,45	0,75	0,75
-------------	------	------	------

Шаги скрутки, мм:	
-------------------	--

внутреннего пови-		
-------------------	--	--

ва	Нет	(18÷20) 3 ×	Нет
--------------	-----	-------------	-----

$$\times 0,15 = 8,1 \div 9$$

наружного повива . .	$(14 \div 16) 0,45 =$	$(14 \div 16) 0,75 =$	$(14 \div 16) 0,75 =$
----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

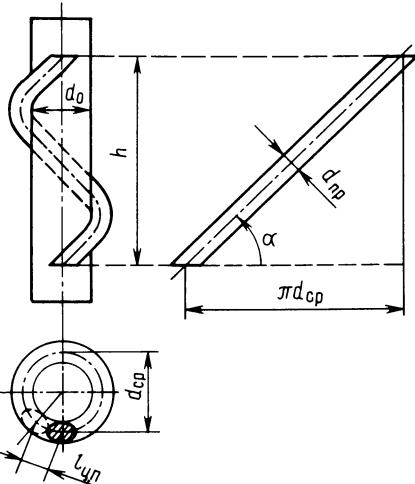
$$= 6,3 \div 7,2 \qquad \qquad = 10,5 \div 12 \qquad \qquad = 10,5 \div 12$$

При этом необходимо помнить отличительную особенность схемы 1+6, которая состоит в том, что даже при продольной укладке проволоки второго повива соприкасаются между собой. При спиральной укладке по-перечное сечение проволоки приобретает чечевицеобразную форму, которую при обычно применяемых больших углах скрутки упрощенно принимают эллипсной [3]. Если принять, что скрутка производится с кратностью 20, то большая ось эллипса будет равна $1,005 d_{\text{пр}}$. Проволоки контактируют между собой по линии, соединяющей их центры. За счет спиральности расстояние между центрами либо должно увеличиться примерно на 0,4%, и в этом случае образуется соответствующий зазор между центральной проволокой и вторым повивом, либо должна произойти деформация проволок с образованием контактных площадок шириной около $0,09 d_{\text{пр}}$. На практике, видимо, реализуются оба эффекта. Таким образом, в проводнике конструкции 1+6 обеспечен контакт между проволоками верхнего повива. В проводнике конструкции 1+6+12 между проволоками верхнего повива образуются небольшие зазоры [74], что может оказаться на контактных сопротивлениях и высокочастотном сопротивлении внутреннего проводника.

Вторая особенность конструкции 1+6 проявляется при механических нагрузках, особенно при изгибах и перегибах. Поскольку центральная проволока лежит прямолинейно, в отличие от проволок второго повива, расположенных по спирали, она работает не как пружина, а как стержень. Поэтому при растягивающих и циклических изгибающих нагрузках в первую очередь, как правило, разрушается центральная проволока. Подробнее вопрос о механических нагрузках на отдельные проволоки рассмотрен в [75].

Рис. 5.6. Расположение проволоки (корделя) в повиве и развертка проволоки на плоскость:

d_0 – диаметр сердечника; h – шаг скрутки; α – угол скрутки; $d_{\text{пр}}$ – диаметр отдельной проволоки; d_{cp} – средний диаметр повива; $l_{\text{ц.п.}}$ – расстояние между центрами проволок



Помимо конструкции и шага скрутки внутреннего проводника необходимо знать степень укрутки проволок за счет спиральности, которая определяется через коэффициент укрутки. Последний показывает, во сколько раз длина проволоки в повиве больше линейной длины скрученного проводника:

$$k_{\text{укр}} = \frac{1}{h} \sqrt{h^2 + \pi^2 d_{\text{cp}}^2} = \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha} = 1 / \sin \alpha; \quad (5.27)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(h / \pi d_{\text{cp}}), \quad (5.28)$$

где $d_{\text{cp}} = d_0 + d_{\text{пр}}$ – средний диаметр повива; d_0 – диаметр сердечника; α – угол скрутки.

Проволока в повиве – это характерный случай спирального элемента (рис. 5.6).

Кордель, лента в обмотке, отдельная прядь в оплётке также характеризуются шагом, углом и кратностью наложения и коэффициентом укрутки, т.е. и для них справедливы формулы (5.27), (5.28).

В случае если внешний проводник выполняется в виде повива, то число проволок, укладываемых в повив, определяется по формуле

$$n = 180 / \arcsin(l_{\text{ц.п.}} / d_{\text{cp}}), \quad (5.29)$$

где $l_{\text{ц.п.}}$ – расстояние между центрами проволок; в случае круглых проволок

$$l_{\text{ц.п.}} = d_{\text{пр}} / \sin \alpha. \quad (5.30)$$

Рекомендации по крутильному оборудованию наиболее полно изложены в [76].

Расчет режимов оплетки. В конструкциях радиочастотных кабелей оплетка применяется главным образом для изготовления гибких и комбинированных внешних проводников. Оплетка проволокой используется также для защитных покровов кабелей, подверженных механическим нагрузкам. Ее нередко называют панцирной оплеткой. В защитных покровах теплостойких кабелей достаточно широко используется оплетка стеклянными или другими теплостойкими нитями.

Вывод параметров, характеризующих оплетку, дан в [69]. Следует отметить также весьма обстоятельную, хотя и устаревшую в части технологического оборудования книгу [77].

Расчет режимов оплетки следует выполнять по формулам

$$\Pi_{\text{опл}} = 2\Pi_1 - \Pi_1^2; \quad (5.31)$$

$$\Pi_1 = \frac{an d_{\text{пр}}}{h \cos \alpha}; \quad (5.32)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = h / \pi(D + \Delta), \quad (5.33)$$

где $\Pi_{\text{опл}}$ – поверхностная плотность оплетки; Π_1 – линейная плотность¹ оплетки; a – половина числа катушек оплеточной машины (число прядей одного направления на длине одного шага оплетки); n – число проволок или нитей в пряди; $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки или кроющая ширина нити; h – шаг оплетки; α – угол оплетки; D – диаметр оплетаемой заготовки (диаметр по изоляции); Δ – радиальная толщина оплетки.

В большинстве расчетов требуется определить шаг оплетки, когда заданы ее плотность и диаметр заготовки. Для таких расчетов следует использовать формулу (5.32) или формулу, полученную из (5.32) и (5.33):

$$h = \pi(D + \Delta) \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{an d_{\text{пр}}}{\pi(D + \Delta) \Pi_1} \right), \quad (5.34)$$

где

$$\Pi_1 = 1 - \sqrt{1 - \Pi_{\text{пов}}} \quad (5.35)$$

Расчетное значение шага сопоставляется с матрицей шагов оплеточной машины и выбирается наиболее близкое значение. Рядом параметров – типом оплеточной машины, диаметром и числом проволок в пряди – необходимо задаваться. Все это усложняет поиск оптимального режима

¹ Линейная плотность – отношение поверхности, закрытой прядями одного направления, к полной поверхности оплетаемой заготовки.

оплетки, который удается выбрать только путем последовательных приближений.

Значительное ускорение и наглядность обеспечивают номограммы оплетки. Они одинаково пригодны для расчета оплеток из проволок и нитей. Они не являются универсальными, так как каждая отдельная номограмма пригодна для расчета оплеток только с вполне определенной плотностью. Но обычно требуется, чтобы плотность оплетки была не ниже или не выше заданного уровня (например, не менее 90%), поэтому, имея ряд номограмм на наиболее часто используемые значения плотности, можно значительно сократить трудоемкость выбора режима оплетки.

На рис. 5.7–5.10 приводятся номограммы для наиболее распространенных в кабельной промышленности 16- и 24-катушечных машин на плотности 96 и 90%. Для автоматизации расчета режимов оплетки весьма подходят программируемые микрокалькуляторы. Выбор оптимального режима заметно ускоряется, если учитывать изложенные ниже рекомендации.

Угол оплетки. Допустимые углы оплетки лежат в диапазоне $20\text{--}75^\circ$. За пределами этого диапазона резко ухудшается качество. Для каждого конкретного материала, как правило, допустим еще более узкий диапазон углов оплетки.

Так, при оплетке проволокой допустимы углы $35\text{--}65^\circ$, что связано с малыми упругими деформациями металлов. При углах меньше 35 и больше 65° проволока при переплетении испытывает большие деформации и возможны выпучивание отдельных проволок из пряди и неплотное прилегание прядей к поверхности заготовки. Для нитей нет ограничений по углу благодаря их прочности и эластичности.

На 24-катушечных машинах могут быть допущены несколько меньшие углы оплетки, чем на 16-катушечных. Это объясняется тем, что на машинах с большим числом катушек меньше изменение длины прядей при переплетении.

При расчете режимов оплетки кабелей, защитный покров которых включает обмотку фторопластовыми лентами с перекрытием, следует учитывать, что угол оплетки обязательно должен отличаться от угла обмотки не менее чем на $\pm 10^\circ$. В противном случае происходит смещение прядей на краях ленты и значительно ухудшается внешний вид оплетки.

Плотность. При оплетке проволокой наиболее часто используются плотности 96, 90, 80, 70%, а при оплетке нитями 96 и 90%. При выборе режима оплетки проволокой с плотностью 90, 80, 70% допустимы отклонения от расчетного шага в обе стороны. Плотность 96% близка к предельно возможной. При максимальной плотности не происходит плотного прилегания прядей из-за переплетения с прядями противоположного направления. Поэтому если для оплетки плотностью 96% взять шаг, меньший расчетного, то будет превзойдена максимально допустимая плотность. В этом случае имеет место выпучивание отдельных проволок,

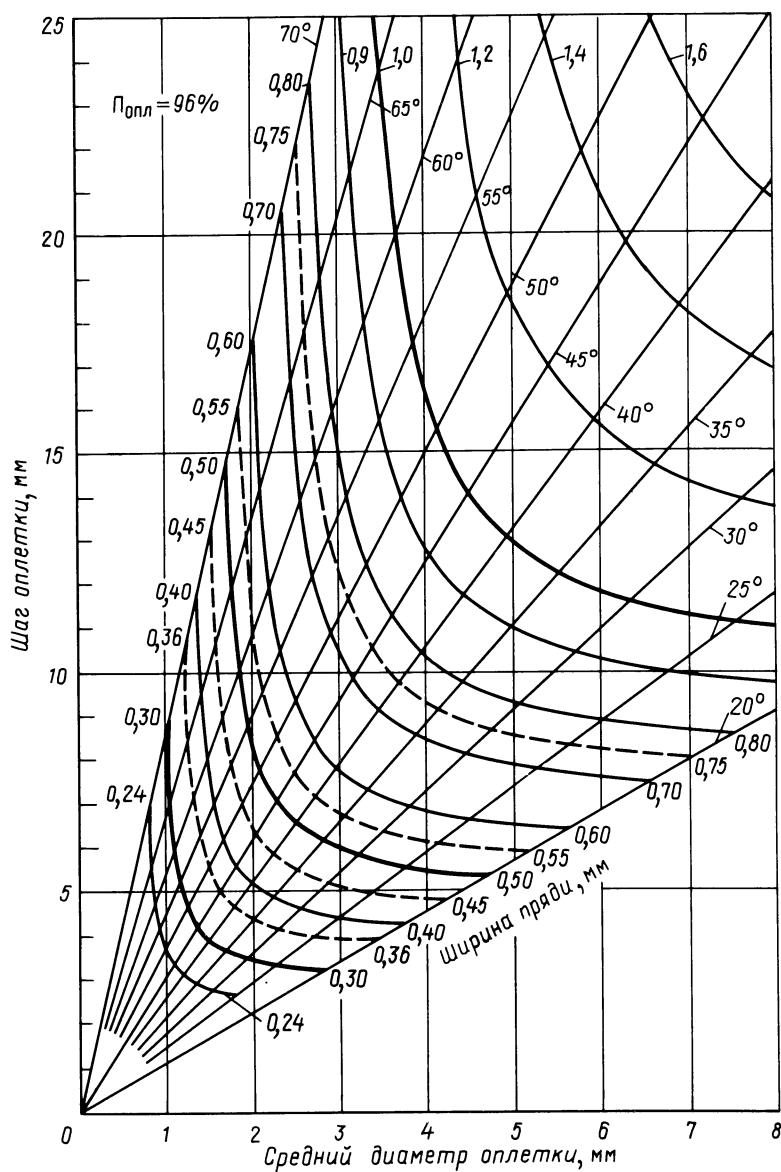


Рис. 5.7. Номограмма оплетки на 16-катушечной машине при плотности 96%

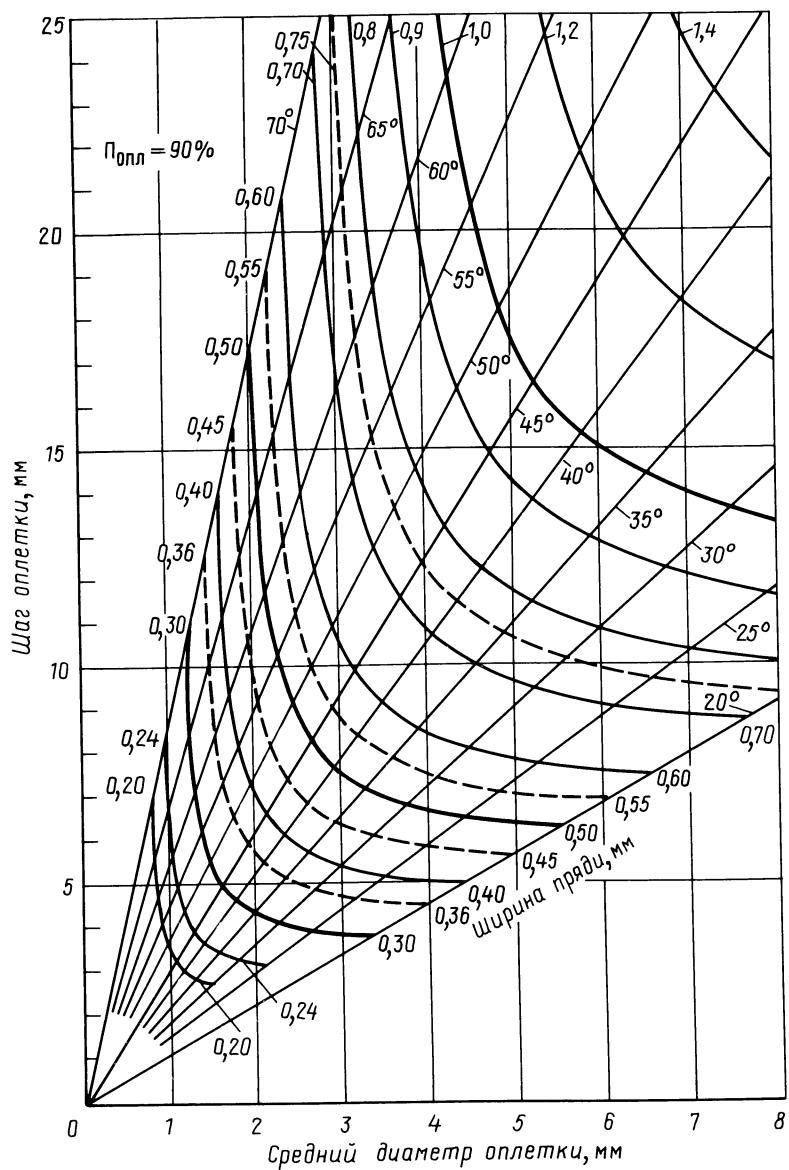


Рис. 5.8. Номограмма оплетки на 16-катушечной машине при плотности 90%

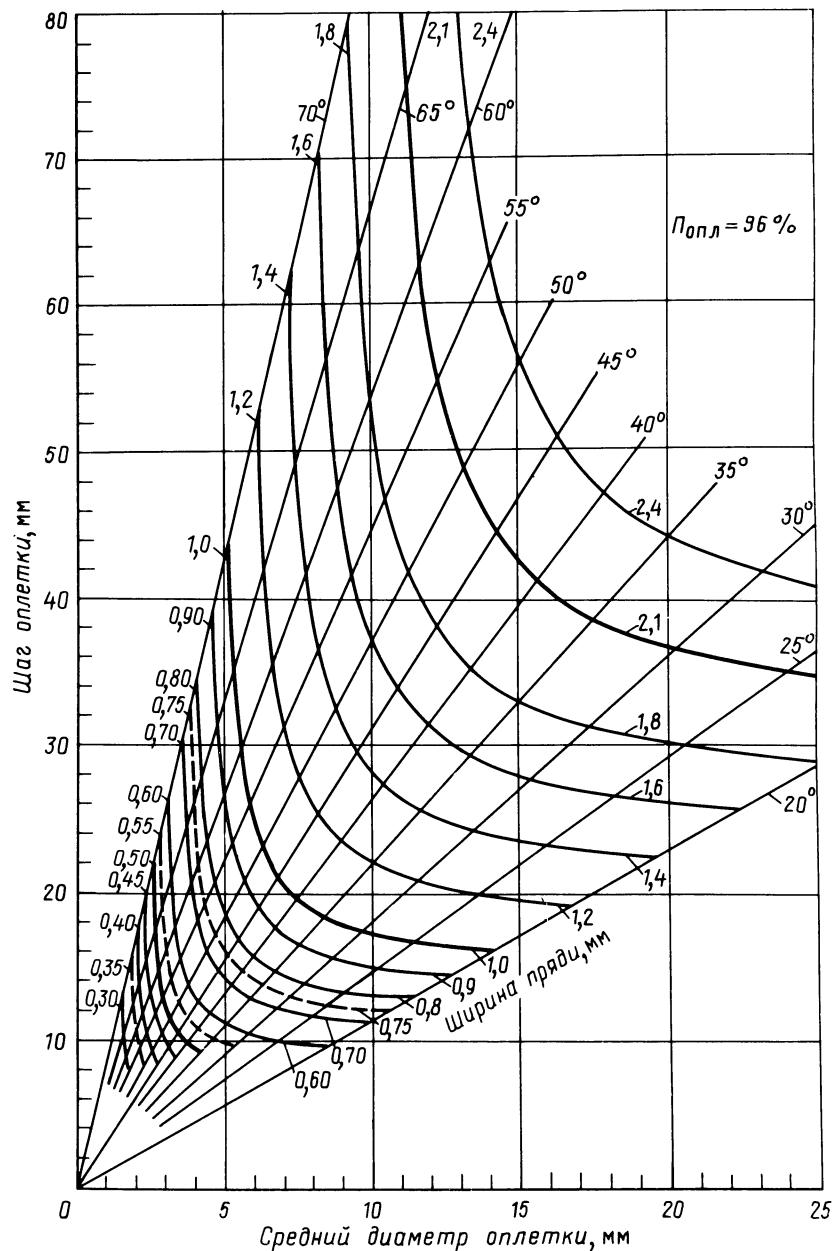


Рис. 5.9. Номограмма оплетки на 24-катушечной машине при плотности 96%

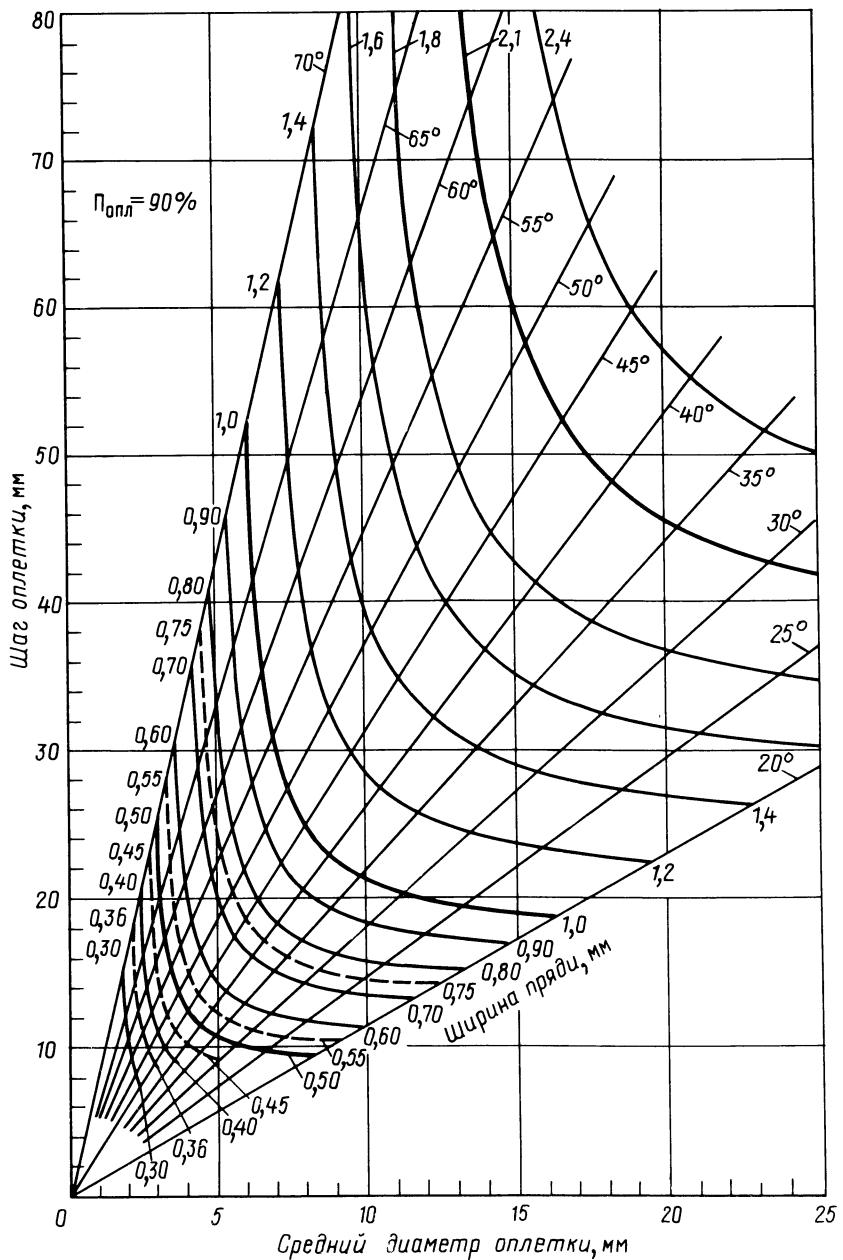


Рис. 5.10. Номограмма оплетки на 24-катушечной машине при плотности 90%
169

пряди неплотно прилегают друг к другу, а оплётка неплотно прилегает к поверхности изоляции. Внешний вид таких оплёток ухудшается, увеличиваются против расчетных: радиальная толщина оплётки и расход металла.

При оплётке нитями с плотностью, большей максимальной, не происходит полного расстилания (расплющивания) нитей и увеличивается радиальная толщина. Это явление можно использовать при наложении бандажных оплёток на кабели, подверженные внутреннему или внешнему давлению.

С учетом зазоров между параллельными прядями шаг оплётки при максимальной плотности может быть определен по формуле

$$h = \frac{\pi(D + \Delta)}{\sqrt{\left[\frac{\pi(D + \Delta)}{ad_{\text{пр}}(n + 0,73)} \right]^2 - 1}} \quad . \quad (5.36)$$

Формула (5.36) справедлива в предположении, что пряди встречных направлений переплетаются под прямыми углом и толщина оплётки точно равна $2d_{\text{пр}}$. Первое условие обычно выполняется, так как влияние внешнего проводника максимальной плотности на коэффициент затухания и экранные свойства наилучшим образом проявляется при углах оплётки $42\text{--}45^\circ$.

Диаметр проволок оплётки взаимосвязан с диаметром оплетаемой заготовки (рис. 5.11). На рисунке обобщен отечественный и зарубежный опыт. Кабель данного размера может оплестись проволокой двух-трех номиналов. Увеличение диаметра проволок оплётки повышает технологичность процесса, но одновременно увеличивает расход металла, массу кабеля и снижает гибкость. На графике выделены рекомендуемые значения.

Радиальная толщина оплётки в отечественной практике принимается равной $2d_{\text{пр}}$. Реально толщина оплётки несколько больше за счет упругих свойств проволок. В руководстве по составлению частных спецификаций на радиочастотные кабели (Публикация МЭК 96-0) рекомендуется принимать

$$\Delta = 2,25 d_{\text{пр}}. \quad (5.37)$$

Тип машины. Наиболее распространенными типами оплеточных машин являются 16- и 24-катушечные. Весьма желательным является установление границ применимости тех и других машин для обеспечения наилучшего качества и наибольшей производительности. Предлагается пользоваться табл. 5.2. Она составлена для угла оплётки 60° и справедлива для оплёток проволоками и нитями. Практически это таблица минимально допустимых для 24-катушечных машин заготовок.

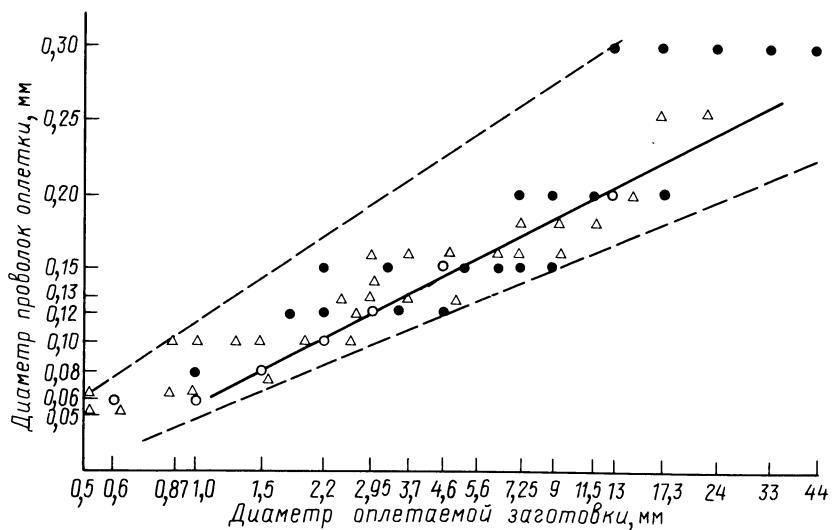


Рис. 5.11. Соотношение между диаметрами проволок оплетки и оплетаемой заготовки (точками отмечены реальные исполнения оплеток)

Пример расчета параметров оплетки. Задание – уточнить конструкцию внешнего проводника кабеля РК 50-3-21 и рассчитать режим его наложения оплеткой.

Диаметр кабеля по изоляции – 2,95 мм. Оплетка выполняется медными посеребренными проволоками диаметром 0,12 мм. Поверхностная плотность оплетки должна быть от 0,88 до 0,92, а угол оплетки $40\text{--}60^\circ$ (см. гл. 7).

Радиальная толщина оплетки согласно (5.37) равна 0,27 мм, а средний диаметр оплетки ($D + \Delta$) равен 3,22 мм. Как видно из табл. 5.2, может быть применена 24-катушечная оплеточная машина, следовательно, $a = 12$. Использование 16-катушечной машины ($a = 8$) также допустимо.

Таблица 5.2. Минимальный диаметр заготовки, мм, для 24-катушечных оплеточных машин ($\alpha = 60^\circ$)

Кроющая ширина пряди, мм	Поверхностная плотность, %			
	96	90	80	70
0,40	2,3	2,6	3,2	3,9
0,50	2,7	3,2	4,0	4,9
0,60	3,3	3,9	4,8	5,8
0,75	4,1	4,8	6,0	7,3
0,90	5,0	5,8	7,1	8,7

Среднее значение заданной плотности – 0,90; согласно (5.35) определим линейную плотность, она равна 0,684. Средний угол оплетки 50° . С помощью номограммы (рис. 5.9) или по формулам (5.32) и (5.33) найдем, что угол 50° будет получен при шаге оплетки более 12 мм. При этом ширина пряди должна быть 0,48 мм, т.е. $n = 4$ ($4 \times 0,12 = 0,48$).

Диапазон шагов, соответствующий заданному диапазону углов, определяется по (5.33): 8,5–17,5 мм. С другой стороны, допустимый диапазон шагов определяется исходя из заданного диапазона поверхностных плотностей по (5.34): 13,2–17,9 мм. Окончательно получаем допустимый диапазон шагов 13,2–17,5 мм.

Для оплетки радиочастотных кабелей обычно применяются 24-категориевые карусельные машины Дратекс 24(НГ-24) типа 127. По паспорту на указанную машину находим, что стандартный комплекс сменных шестерен позволяет установить шаги от 13,6 до 17,32 мм. Выбираем шаг 16,2 мм. Вычисляем уточненные значения параметров оплетки: $h = 16,2$ мм; $n = 4$; $d_{\text{пр}} = 0,12$ мм; $\Pi_{\text{опл}} = 0,89$; $\Pi_1 = 0,671$; $\alpha = 58^\circ$.

Аналогично можно рассчитать параметры и режим оплетки на 16-категориевой карусельной машине Дратекс 16(НГ-16), тип 124: $h = 16,8$ мм; $n = 6$; $d_{\text{пр}} = 0,12$ мм; $\Pi_{\text{опл}} = 0,887$; $\Pi_1 = 0,665$; $\alpha = 59^\circ$.

5.4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ОБМОТКИ

Наложение изоляции и оболочек радиочастотных кабелей осуществляется главным образом методами экструзии и обмотки. Расчет режимов экструзии и рекомендации по выбору технологического оборудования даны в [69, 78] и в данной книге не рассматриваются. Обмотка широко применяется при наложении сплошной и полу воздушной ленточной изоляции и при наложении корделя. Интерес к обмотке лентами снова возрос, так как этот процесс отличается простотой, в два-три раза меньшей по сравнению с экструзией энергоемкостью, малыми длинами заправочных концов, экологической чистотой. Благодаря применению ЭВМ появилась возможность выбора оптимальных режимов с жесткими допусками по перекрытию и по диаметру [79].

Обмотку корделем можно рассматривать как повив пластмассового стержня по изолированному или неизолированному внутреннему проводнику. Поэтому для обмотки корделем могут использоваться формулы (5.27), (5.28). Шаг наложения корделя выбирается из соображений гибкости и требований к эквивалентной диэлектрической проницаемости. Гибкость увеличивается при уменьшении шага наложения корделя; в особо гибких кабелях кордель накладывается виток к витку. Напротив, эквивалентная диэлектрическая проницаемость, ради уменьшения которой и используются кордельные конструкции, тем меньше, чем большие шаг обмотки. При расчете среднего диаметра и диаметра по корделю необходимо учитывать сплющивание корделя, которое состав-

ляет от 2 до 5%. Диаметр по обмотке корделием

$$d = d_0 + 2d_k k_{\text{сп}}, \quad (5.38)$$

где d_0 – диаметр обматываемого сердечника; d_k – диаметр круглого корделя или высота прямоугольного; $k_{\text{сп}}$ – коэффициент сплющивания, равный 0,95–0,97 для круглого и 0,96–0,98 для прямоугольного корделя.

Математические зависимости между основными параметрами процесса *обмотки лентами* хорошо известны [3,69], но выбор оптимального режима весьма трудоемок, так как требуется учитывать большое число ограничений, по которым нет однозначных рекомендаций. Сам расчет параметров требует не менее трех циклов последовательных уточнений.

Расчетные формулы. Возможны три способа спиральной обмотки лентами: обмотка встык, обмотка с перекрытием и обмотка с зазором. Для характеристики обмотки используются следующие параметры: d_0 – диаметр обматываемого сердечника; $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр текущего слоя обмотки; h – шаг обмотки; b – ширина ленты; δ – толщина ленты; α – угол обмотки; a – нормальное перекрытие или зазор; e – аксиальное перекрытие или зазор (рис. 5.12). Связь между параметрами обмотки описывается формулами (5.39)–(5.41):

$$\pm a = b - h \cos \alpha; \quad \pm a = b - \frac{h \pi d_{\text{ср}}}{\sqrt{h^2 + \pi^2 d_{\text{ср}}^2}}; \quad (5.39)$$

$$b = \frac{h \pi d_{\text{ср}}}{(1 \mp p) \sqrt{h^2 + \pi^2 d_{\text{ср}}^2}}; \quad h = \frac{\pi d_{\text{ср}} b (1 \mp p)}{\sqrt{\pi^2 d_{\text{ср}}^2 - b^2 (1 \mp p)^2}}; \quad (5.40)$$

$$b = \frac{h (1 \pm k) \pi d_{\text{ср}}}{\sqrt{h^2 + \pi^2 d_{\text{ср}}^2}}; \quad h = \frac{\pi d_{\text{ср}} b}{\sqrt{\pi^2 d_{\text{ср}}^2 (1 \pm k)^2 - b^2}}. \quad (5.41)$$

В уравнениях (5.39)–(5.41) и последующих “±” пишутся таким образом, что верхний знак относится к перекрытию, а нижний к зазору:

$$p = a/b, \quad k = e/h, \quad (5.42)$$

где p – относительное нормальное перекрытие (зазор); k – относительное аксиальное перекрытие (зазор).

Следует отметить, что величина p в области перекрытий имеет значения $0 \leq p \leq 1$, а k может быть сколь угодно большим: $0 \leq k < \infty$. В области зазоров наоборот: $0 \leq k \leq 1$, а $0 \leq p < \infty$. Отсюда следует, что при расчете режимов обмотки с перекрытиями удобнее пользоваться величиной нормального перекрытия p (или a), а в области зазоров величиной аксиального зазора k (или e). Связь между p и k определяется соотношениями [69]:

$$p = \frac{k}{1 \pm k}; \quad k = \frac{p}{1 \mp p}. \quad (5.43)$$

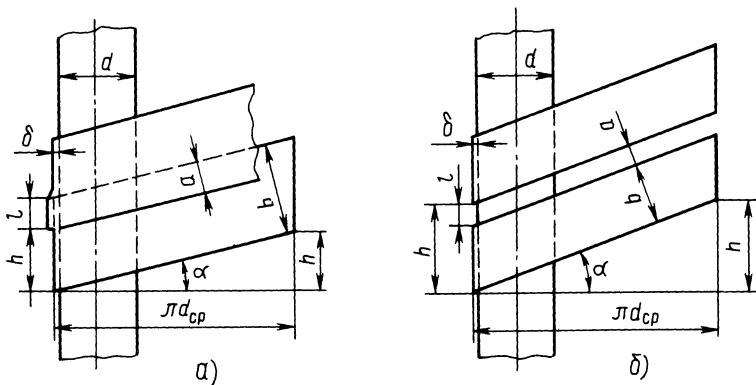


Рис. 5.12. Развертка на плоскость двух витков ленты:
а – обмотка с перекрытием; б – обмотка с зазором

При обмотке встык $p = k$, но чем больше величина перекрытия или зазора, тем существенней разница между p и k (табл. 5.3).

В формулы (5.39)–(5.41) входит значение d_{cp} , которое учитывает радиальную толщину слоя обмотки Δ :

$$d_{cp} = d_0 + \Delta. \quad (5.44)$$

Для радиочастотных кабелей в отличие от силовых [69] нельзя пренебречь разницей между d_{cp} и d , так как даже при диаметре изоляции 7 мм и $\Delta = 0,2$ мм погрешность расчетов составляет 2%. В миниатюрных кабелях погрешность еще значительнее. При расчете режимов используются также формулы (5.27) и (5.28).

Номограммы обмотки. Для ускорения и повышения наглядности процесса поиска режима обмотки рекомендуется пользоваться номограммами, принцип построения которых дан в [69]. Там же приводится ряд номограмм, причем номограммы для кабелей малых диаметров предназначены для расчета режимов обмотки прядями нитей. На рис. 5.13–5.15 построены номограммы обмотки лентами, ориентированные на диапазоны диаметров и шагов, характерных для радиочастотных кабелей. Эти номограммы позволяют определить приведенную ширину, равную ширине ленты при обмотке встык. При расчете режимов обмотки с пере-

Таблица 5.3. Значения p и k для одинаковых абсолютных перекрытий (зазоров), отн. ед.

Параметр	Перекрытие						Встык		Зазор	
p	0,8	0,75	0,67	0,5	0,33	0	0	0,1	0,3	
k	4,0	3,0	2,0	1,0	0,5	0	0	0,09	0,23	

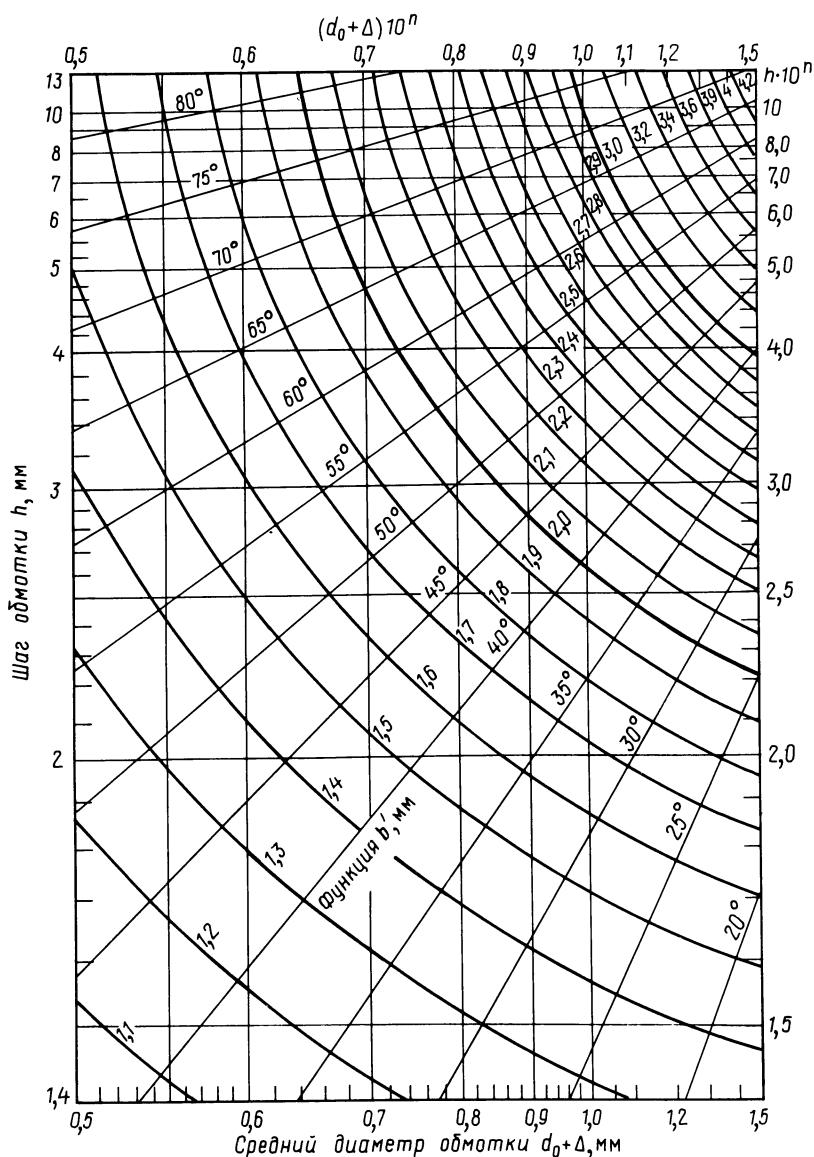


Рис. 5.13. Номограмма для определения параметров обмотки лентами кабельных изделий диаметром 0,5–1,5 и $(0,5–1,5) \cdot 10^{-7}$ мм

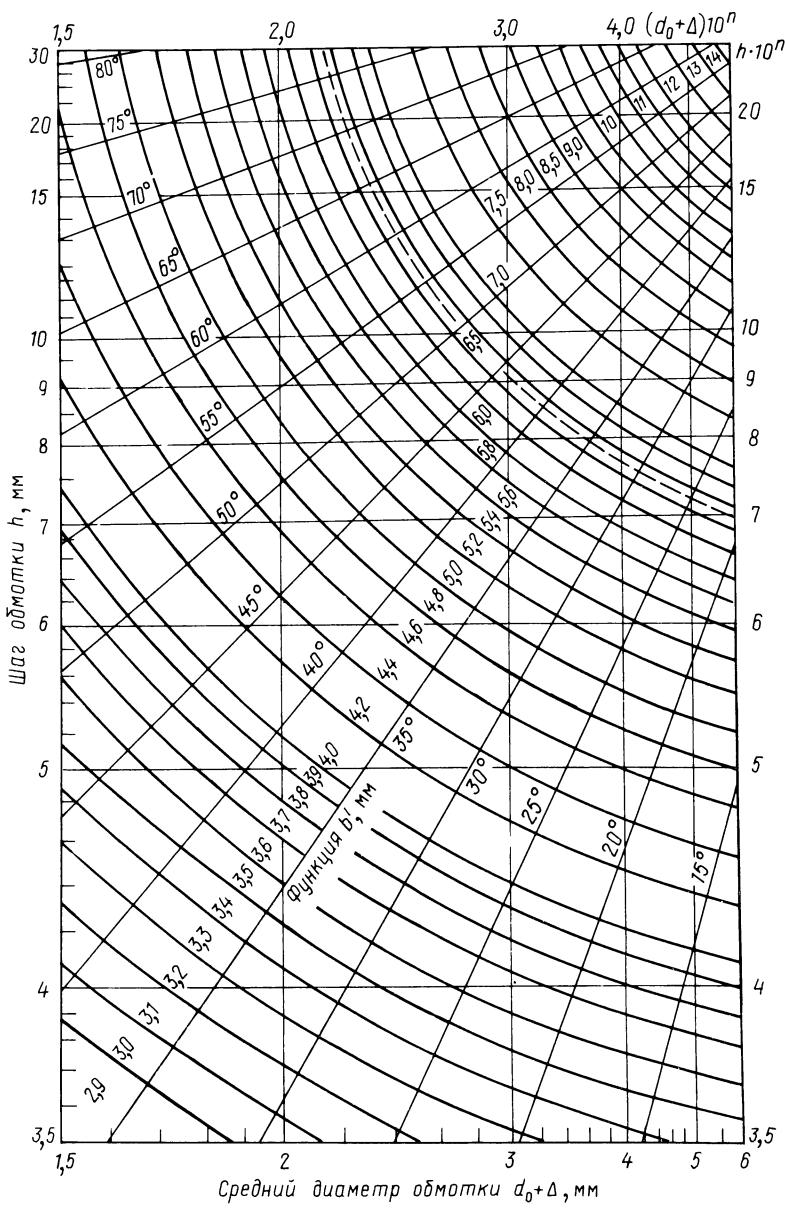


Рис. 5.14. Номограмма для определения параметров обмотки лентами кабельных изделий диаметром 1,5–6,0 и $(1,5–6,0) \cdot 10^n$ мм

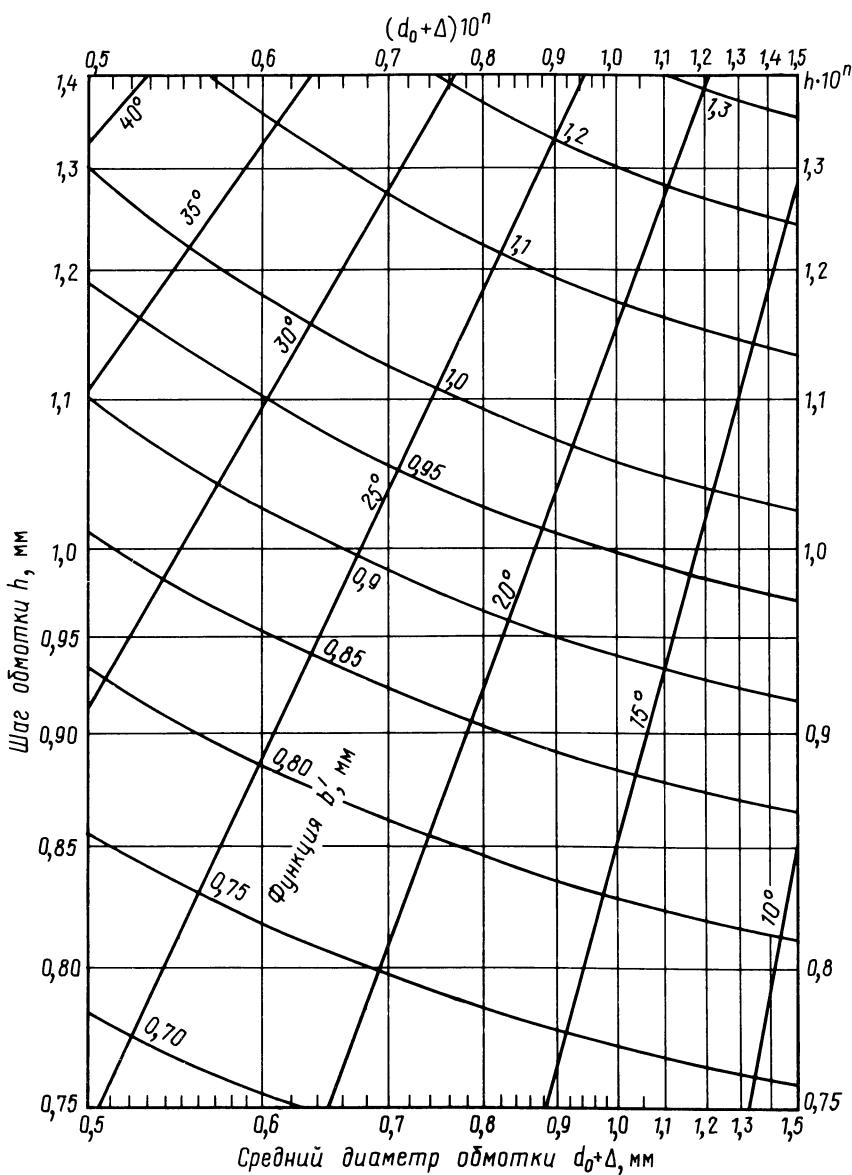


Рис. 5.15. Номограмма для определения параметров обмотки лентами кабельных изделий диаметром $0,5-1,5$ и $(0,5-1,5) \cdot 10^n$ мм при малых углах обмотки

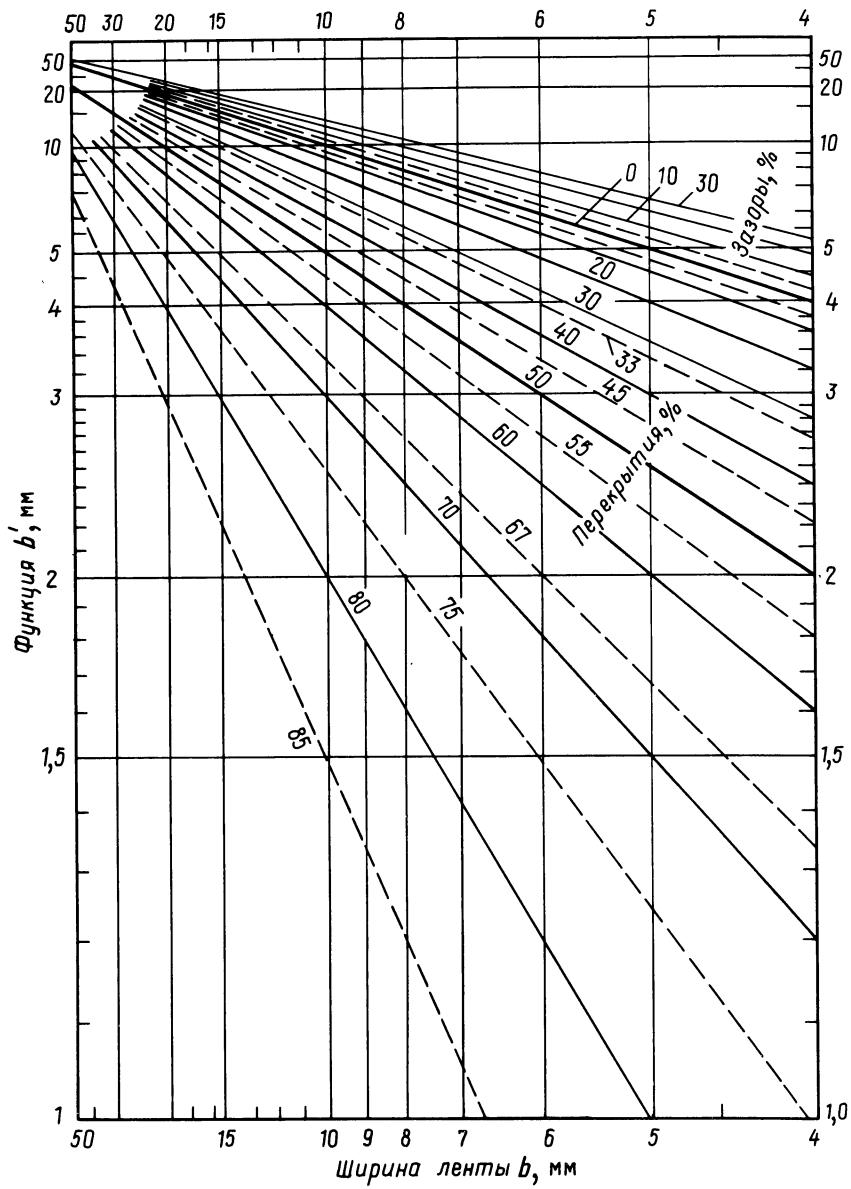


Рис. 5.16. Номограмма для определения перекрытия и ширины ленты

крытием или зазором дополнительно используется номограмма, построенная на рис. 5.16.

Каждая из номограмм на рис. 5.13–5.15 может использоваться не только при указанных на графиках значениях шага обмотки, среднего диаметра и приведенной ширины ленты, но и при одновременном изменении h , d_{cp} и b' в 10^n раз, где n – любое число, обычно целое. Например, номограмма, показанная на рис. 5.13, может использоваться для диаметров от 5 до 15 мм, шагов от 14 до 130 мм и приведенных ширин лент от 11 до 42 мм.

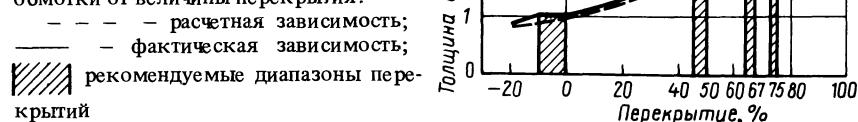
Номограммы наглядно показывают, что при больших углах обмотки (больше 60°) изменения шага мало влияют на величину перекрытия, но сильно влияют изменения диаметра, а следовательно, и толщины лент. По этой причине при больших углах обмотки, характерных для миниатюрных кабелей, следует обратить внимание на точность определения среднего диаметра. При малых углах обмотки (меньше 30°) на величину перекрытия сильно влияет изменение шага и незначительно изменение диаметра, что позволяет верхние слои изоляции среднегабаритных и крупногабаритных кабелей наматывать лентами одной и той же ширины и с постоянным шагом. При малых углах следует обратить внимание на совпадение фактического шага обмотки с вычисленным.

Расчет толщины обмотки. В задачу расчета обмотки входит не только указание шага и ширины лент, но также количества и их толщины. Последнее особенно трудно определить при расчете режимов обмотки для радиочастотных кабелей из-за их многослойности. Точной формулы для определения радиальной толщины слоя обмотки нет, обычно используется формула

$$\Delta = \delta/1 - p. \quad (5.45)$$

Кривая по формуле (5.45) показана на рис. 5.17 пунктирной линией. Реальная зависимость, показанная сплошной линией, имеет несколько

Рис. 5.17. Зависимость толщины слоя обмотки от величины перекрытия:



иной характер, так как при перекрытиях, близких к величинам, дающим кратное увеличение толщины обмотки, наблюдается область нечувствительности. Там же показаны интервалы перекрытий, обеспечивающие наибольшую гладкость обмотки.

Определение оптимального режима. Одна из основных трудностей расчетов состоит в том, что неизвестными являются сразу несколько величин. В начале расчета обычно известны диаметр сердечника и диаметр по изоляции, а также допустимые отклонения для последнего. Шаги обмотки, ширины и толщины лент и величины перекрытий являются исключительными. Для решения уравнений обмотки приходится задаваться одними параметрами (например, относительным перекрытием, толщиной и шириной лент) для отыскания других (шага, угла обмотки и числа лент).

Процесс поиска оптимального режима рекомендуется разбить на следующие пять этапов:

- 1) введение ограничений, связанных с конструкцией кабеля;
- 2) выбор лент для обмотки, введение ограничений, связанных со свойствами лент, уточнение ранее введенных ограничений;
- 3) выбор обмоточной машины с проверкой ее пригодности по ограничениям, введенным в п. 1 и 2, дополнительное уточнение ограничений, определение необходимого числа проходов;
- 4) расчет оптимального режима обмотки для каждой ленты в отдельности, но с учетом всех ранее введенных ограничений,стыковка условий наложения лент на отдельных обмотчиках и обмоточных головках, проверка выполнения требований на допуск по наружному диаметру и строительным длинам;
- 5) оформление всех полученных результатов в виде технологической инструкции.

Под оптимальным мы понимаем режим, дающий наибольшую гладкость обмотки при максимальной производительности обмоточной машины [79].

ГЛАВА 6

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

При конструировании, производстве и эксплуатации радиочастотных кабелей выполняются измерения многочисленных параметров. Чаще всего измеряются конструктивные размеры, волновое сопротивление, коэффициент затухания. Значительно реже и не на всех стадиях жизненного цикла кабелей приходится измерять неоднородность волнового сопротивления, стабильность коэффициента затухания, сопротивление связи.

Во время испытаний радиочастотные кабели подвергаются воздействиям высоких и низких температур, вибрации, солнечной радиации, ударных нагрузок и т.д. Все типы радиочастотных кабелей испытываются высоким напряжением для обнаружения скрытых дефектов. Наибольшее количество испытаний приходится на стадию конструирования.

Измерения и испытания выполняются, как правило, на специализированных установках, с помощью радиотехнической, электроизмерительной и другой аппаратуры. Надо сказать, что только отдельные приборы целенаправленно предназначаются для измерений параметров кабельных изделий. Остальная измерительная техника является типовой для многих отраслей промышленности, а к нуждам кабельной подотрасли она только приспособливается. Так, для измерений высокочастотных характеристик применяется в основном серийная радиоизмерительная аппаратура.

Соединение измеряемого кабеля с прибором выполняется с помощью соединителя (разъема), как правило, специально приспособленного для разрабатываемого изделия. Поэтому одной из важных задач при конструировании радиочастотного кабеля является отработка соответствующего соединителя.

В последнее время все больший вес и значение приобретает автоматизация измерений и испытаний, и в особенности – автоматическая обработка результатов и оформление документа (протокола). Дело в том, что сам процесс измерений и испытаний на современных приборах проходит довольно быстро. Но последующее оформление документации выполняется, как правило, вручную, что отнимает много времени и ведет к появлению ошибок.

Одна из тенденций автоматизации – перенос измерений непосредственно в процесс производства, т.е. совмещение технологических и измерительных операций в единой технологической линии. При этом возможно не только измерение конструкторских параметров изделия, но и вычисление, например, волнового сопротивления.

При разработке, выпуске и эксплуатации измеряются следующие параметры радиочастотных кабелей:

- конструктивные размеры;
- сопротивление проводников (на постоянном токе);
- сопротивление изоляции (на постоянном токе);
- электрическая емкость (на частоте 1 кГц);
- волновое сопротивление (на частоте 1–200 МГц);
- коэффициент затухания (на рабочей частоте);
- сопротивление связи (на частоте 30 МГц);
- коэффициент укорочения длины волны (на частотах 1–200 МГц);
- коэффициент фазы;
- коэффициент отражения (в полосе рабочих частот).

Измерение высокочастотных параметров кабелей рекомендуется проводить на частотах 2; 10; 15; 30; 45; 60; 200; 600 МГц; 1; 1,5;

3; 10; 15; 18 и 26 ГГц. При необходимости измерения указанных параметров выполняются в полосе частот, определенной технической документацией.

Испытания радиочастотных кабелей подразделяются на конструкторские и производственные. Конструкторские испытания выполняются в процессе разработки кабеля, и по объему они значительно больше, чем производственные. Последние подразделяются на приемо-сдаточные и периодические. При модернизации продукции проводятся квалификационные (типовые) испытания. Приемо-сдаточные испытания имеют минимальный объем. Периодические производственные испытания занимают промежуточное положение.

При испытаниях радиочастотных кабелей используются следующие виды воздействий:

- повышенное напряжение частотой 50 Гц;
- многократные изгибы на минимальный радиус;
- двойные перегибы;
- удары, вибрация, линейные нагрузки;
- избыточное давление, вакуум;
- высокие и низкие температуры (до $\pm 200^{\circ}\text{C}$ и более);
- температурные циклы;
- влажность, иней, роса, морской туман;
- агрессивные среды (бензин, масло, кислота и т.п.);
- грибы, грызуны;
- тропические условия;
- космические условия;
- солнечная радиация, озон;
- ионизирующие излучения и т.д.

Все испытания и измерения в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 11326.0-78 проводят при температуре окружающей среды $25 \pm \pm 10^{\circ}\text{C}$, относительной влажности воздуха 45–80% и атмосферном давлении 85–107 кПа (630–800 мм рт. ст.).

Ниже рассмотрены теоретические особенности измерений высокочастотных параметров радиочастотных кабелей, а также кратко основные методы измерений. При этом мы исходим из того, что более подробно методы измерений и испытаний изложены в специализированной литературе [1, 2, 13, 80].

6.2. РАДИОЧАСТОТНЫЙ КАБЕЛЬ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ

Радиочастотные кабели как в процессе разработки, так и в применении используются в виде отрезков, армированных соединителями. Обычно отрезок кабеля с соединителями рассматривается как единый четырехполюсник (двухплечий узел) [81]. В практике же бывает необходимо из свойств узла извлечь параметры собственно отрезка кабеля. При измерениях решается именно такая задача.

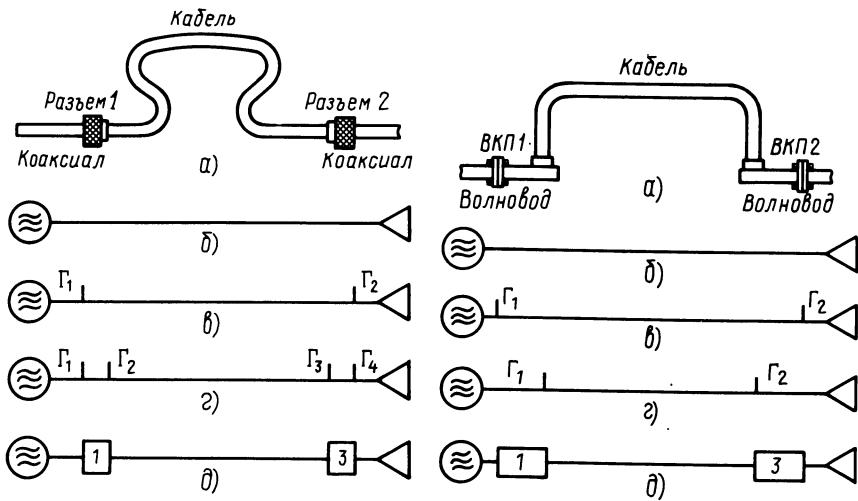


Рис. 6.1. Включение измеряемого отрезка кабеля в коаксиальный тракт и эквивалентные схемы:

а – принцип включения; *б–д* – эквивалентные схемы: с идеальным согласованием (*б*); реальный тракт с короткими соединителями (*в*); реальный тракт с длинными соединителями (*г*) и соединителями сложной структуры (каскадное соединение двухплечих узлов; узел собственно кабеля не выделен) (*д*)

Рис. 6.2. Включение измеряемого отрезка кабеля в волноводный тракт и эквивалентные схемы:

а – принцип включения; *б–д* – эквивалентные схемы: реальный тракт без учета затухания ВКП (*в*); реальный тракт с учетом затухания ВКП (*г*) и с ВКП сложной структуры (каскадное соединение двухплечих узлов; узел собственно кабеля не выделен) (*д*)

При анализе отрезка кабеля как элемента тракта оконечное устройство, заделанное на кабель, может рассматриваться либо как сосредоточенная нерегулярность – в случае, когда длина волны много больше, чем размеры оконечного устройства, либо как двухплечий узел – когда длина волны соизмерима с размерами оконечного устройства. Первый подход близок к теории длинных линий, второй – к теории цепей. Если отрезок коаксиального кабеля работает на частотах, близких к критическим, то оба указанных подхода не могут быть применены, и в этом случае должен использоваться наиболее общий, электродинамический подход.

Рассмотрим включение отрезка радиочастотного кабеля в коаксиальный и волноводный измерительные тракты (рис. 6.1 и 6.2).

Коаксиальные соединители (рис. 6.1, *а*) встречаются двух основных видов. У первого вида место разделки кабеля и место высокочастотного

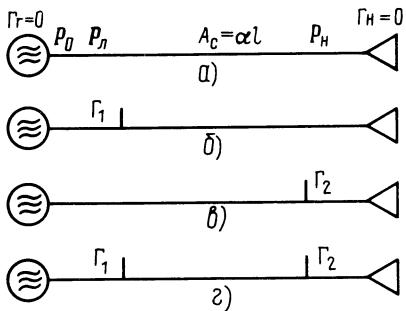


Рис. 6.3. Эквивалентные схемы измерительного тракта с отрезком кабеля, вносящим одну или две концевые нерегулярности:

a – идеальное согласование; *b* – преобладает входная нерегулярность; *c* – преобладает выходная нерегулярность; *г* – входная и выходная нерегулярности сравнимы

соединения расположены близко друг к другу. У второго – место разделки кабеля и место присоединения разделены довольно длинной конической или цилиндрической частью, представляющей собой отрезок коаксиальной линии. В связи с этим можно считать соединитель либо одной сосредоточенной нерегулярностью [81], либо отдельным отрезком линии с концевой нерегулярностью [82], что соответственно представлено эквивалентными схемами на рис. 6.1, *в* и *г*. Наконец, более общий случай, когда в соединителе трудно выделить какие-либо сосредоточенные нерегулярности, и тогда эквивалентная схема будет такой, как показано на рис. 6.1, *д* (на рис. 6.1, *б* представлено идеальное согласование).

Для включения коаксиального кабеля в волноводный тракт применяются коаксиально-волноводные переходы (КВП) (рис. 6.2, *а*). Кабель разделяется в виде зонда и погружается в волновод, а связь настраивается. При этом сама область связи может рассматриваться как сосредоточенная нерегулярность. Так как присоединение волноводов с помощью стандартных фланцев вносит небольшую нерегулярность, может быть использована эквивалентная схема на рис. 6.2, *в*, где нерегулярности Γ_1 и Γ_2 соответствуют областям связи кабеля с волноводом в КВП. При необходимости учета потерь в отрезках волновода, входящих в КВП, следует использовать эквивалентную схему на рис. 6.2, *г*. Если невозможно выделить отдельные нерегулярности в соединении, используется схема на рис. 6.2, *д* (рис. 6.2, *б* соответствует идеальному согласованию). Отметим, что способ подключения кабеля при помощи КВП в последнее время при измерениях используется редко, но еще широко применяется в эксплуатационных условиях.

Рассмотрим затухание измерительного тракта, содержащего отрезок кабеля с одной или двумя концевыми нерегулярностями. Схематические изображения соответствующих трактов представлены на рис. 6.3 (генератор не зависит от нагрузки).

В схеме рис. 6.3, *а* вносимое отрезком затухание (вносимые потери) равно собственному затуханию отрезка кабеля [81]:

$$A_{\text{вн}} = A_c = 10 \lg \frac{P_0}{P_h} = \alpha l, \quad (6.1)$$

где α – коэффициент затухания регулярного кабеля в режиме бегущей волны, дБ/м; l – длина отрезка кабеля, м; P_0 – мощность, отдаваемая генератором в согласованную нагрузку; P_h – мощность, поступающая в нагрузку.

Для случаев рис. 6.3, б–г в [81] приводятся выражения для мощности, поступающей в нагрузку, однако линия берется без потерь. Рассмотрим случай рис. 6.3, б, но с потерями. Здесь и дальше имеется в виду такая цепь, в которой мощность, отдаваемая генератором P_0 , постоянна и генератор имеет входной коэффициент отражения $\Gamma_g = 0$. Мощность, прошедшая в линию после входной нерегулярности Γ_1 , для случая рис. 6.3, б:

$$P_L = P_0 (1 - |\Gamma_1|^2). \quad (6.2)$$

Потери, вносимые отрезком в этом случае, состоят из собственного затухания кабеля и потерь на отражение:

$$A_{\text{вн}} = A_c + 10 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma_1|^2}. \quad (6.3)$$

Выражение $10 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma_1|^2}$ представляет собой добавку к собственному затуханию. Вносимые потери в схеме рис. 6.3, в вычисляются аналогично.

Мощность, передаваемая в нагрузку при включении по схеме рис. 6.3, г, определяется в [81], без учета затухания линии, следующим выражением

$$P_h = \frac{(1 - |\Gamma_1^2|) (1 - |\Gamma_2|^2)}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-j2\beta l}|^2}, \quad (6.4)$$

где β – коэффициент фазы кабеля; l – длина кабеля.

С учетом потерь в линии вносимое затухание будет определяться следующим образом (рис. 6.3, г):

$$A_{\text{вн}} = A_c + 10 \lg \frac{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\alpha l} e^{-2j\beta l}|^2}{(1 - |\Gamma_1|^2) (1 - |\Gamma_2|^2)}. \quad (6.5)$$

Для двух предельных значений этого выражения, когда отраженные от обеих нерегулярностей волны складываются или вычитаются, и при

$\alpha l \rightarrow 0$ получаем соответственно:

$$A_{\text{внmax}} = A_c + 10 \lg \frac{(1 + |\Gamma_1| |\Gamma_2|)^2}{(1 - |\Gamma_1|^2)(1 - |\Gamma_2|^2)} ; \quad (6.6)$$

$$A_{\text{внmin}} = A_c + 10 \lg \frac{(1 - |\Gamma_1| |\Gamma_2|)^2}{(1 - |\Gamma_1|^2)(1 - |\Gamma_2|^2)} . \quad (6.7)$$

Учитывая, что варианты $\Gamma_1 \gg \Gamma_2$ и $\Gamma_1 \ll \Gamma_2$ определяются выражением (6.3), запишем (6.6) и (6.7) для $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma$:

$$A_{\text{внmax}} = A_c + 20 \lg \frac{1 + |\Gamma|^2}{1 - |\Gamma|^2} , \quad (6.8)$$

$$A_{\text{внmin}} = A_c . \quad (6.9)$$

Формулы (6.8) и (6.9) дают наибольшую и наименьшую (равную нулю) возможные добавки к собственному затуханию из-за двух концевых нерегулярностей. Наконец, для случая больших потерь в линии ($e^{-2\alpha l} \rightarrow 0$) при $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma$ получаем

$$A_{\text{вн}} = A_c + 20 \lg \frac{1}{1 - |\Gamma|^2} . \quad (6.10)$$

Формулы (6.3), (6.8), (6.10), выраженные через коэффициент стоячей волны (КСВ), имеют следующий вид (соответственно):

$$\text{КСВ} = r = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} ; \quad (6.11)$$

$$A_{\text{вн}} = A_c + 10 \lg \frac{(r + 1)^2}{4r} ; \quad (6.12)$$

$$A_{\text{внmax}} = A_c + 10 \lg \frac{(r^2 + 1)^2}{4r^2} ; \quad (6.13)$$

$$A_{\text{внmin}} = A_c + 20 \lg \frac{(r + 1)^2}{4r} . \quad (6.14)$$

Эти выражения необходимы по той причине, что радиоизмерительные приборы, выпускаемые в настоящее время, проградуированы в значениях КСВ.

По выражениям (6.12), (6.13), (6.14) рассчитаны и представлены на рис. 6.4 соответствующие добавки к собственному затуханию.

В некоторых случаях, описанных выше, отрезок кабеля при анализе не может быть заменен простой эквивалентной схемой — регулярным кабелем с двумя нерегулярностями на концах. Тогда необходимо ис-

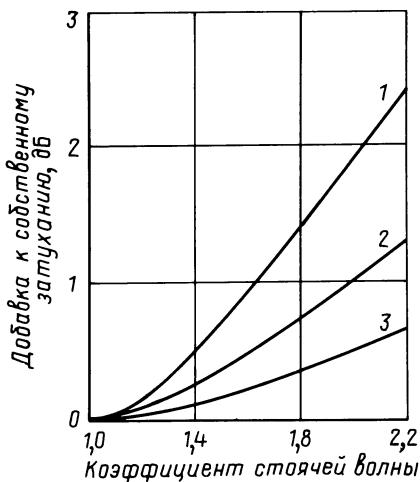


Рис. 6.4. Добавка к собственному затуханию отрезка из-за концевых нерегулярностей:

1 – максимальная добавка из-за двух одинаковых концевых нерегулярностей при $al < 1$ дБ; $10\lg[(r^2 + 1)^2 / 4r^2]$; 2 – добавка из-за двух одинаковых концевых нерегулярностей при $al > 20$ дБ; $20\lg[(r + 1)^2 / 4r]$; 3 – добавка из-за одиночной нерегулярности; $10\lg[(r + 1)^2 / 4r]$

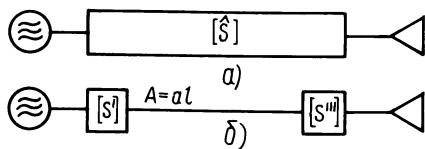


Рис. 6.5. Эквивалентные схемы измерительного тракта с отрезком кабеля, представленным как каскадное соединение двухплечих узлов (четырехполюсников):

a – наиболее общий случай; *б* – два узла, соединенных кабелем (четырехполюсник, соответствующий кабелю, не обозначен)

пользовать представление об отрезке кабеля, армированном окончными устройствами, как о двухплечем волноводном узле (четырехполюснике) или о каскадном соединении узлов и применять разработанную для этого класса устройств теорию цепей [22, 81, 83, 84] с приложением матриц и графов. Но если отрезок с концевыми нерегулярностями описывается простейшими эквивалентными схемами, то рассмотрение его как четырехполюсника более сложно и приводит к неоднозначности оценок собственно кабеля. В частности, оказывается невозможным строго рассчитывать собственное затухание кабеля, так как структура измеряемого узла при данном подходе полагается неизвестной.

На рис. 6.5, *a* дана эквивалентная схема отрезка кабеля с соединителями как двухплечего узла и на рис. 6.5, *б* – возможное разложение этого узла на элементарные двухплечие узлы.

В [81] рассматриваются все виды потерь, вносимых узлом, и вводится понятие собственного затухания как наименьшей из составляющих потерь, обусловленных рассеянием в узле. Определяя собственные потери узла, можно с наименьшей ошибкой найти затухание входящего в этот узел отрезка кабеля.

Для случая, представленного на рис. 6.5, *a*, собственное затухание узла через *S*-параметры выражается так [81]:

$$A_{sy} = 10\lg \frac{1 - |\hat{S}_{11}|^2}{|\hat{S}_{21}|^2}, \quad (6.15)$$

где \hat{S}_{11} и \hat{S}_{21} – элементы матрицы рассеяния узла.

Теперь запишем матрицу рассеяния для каскадного соединения трех узлов (рис. 6.5, б) [84] :

$$\left. \begin{aligned} \hat{S}_{11} &= S'_{11} + \frac{S'_{21}S''_{11}S'_{12}(1 - S''_{22}S''_{11}) + S'_{21}S''_{21}S'''_{11}S''_{12}S'_{12}}{N} ; \\ \hat{S}_{12} &= \frac{S'''_{12}S''_{12}S'_{12}}{N} ; \quad \hat{S}_{21} = \frac{S'_{21}S''_{21}S'''_{21}}{N} ; \\ \hat{S}_{22} &= S''''_{22} + \frac{S'''_{12}S''_{22}S''_{21}(1 - S'_{22}S''_{11}) + S'''_{12}S''_{12}S'_{22}S''_{21}S'''_{21}}{N} ; \\ N &= 1 - S'_{22}S''_{11} - S'_{22}S''_{21}S'''_{11}S''_{12} - S''_{22}S'''_{11} + S'_{22}S''_{11}S''_{22}S'''_{11}, \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

где $|S'|$, $|S''|$ и $|S'''|$ – матрицы рассеяния каждого узла, а $|\hat{S}|$ – матрица рассеяния каскадного соединения. Если учесть, что отрезок собственно кабеля имеет матрицу рассеяния

$$[S''] = [S_K] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma l} \\ e^{-\gamma l} & 0 \end{bmatrix}$$

(где γ – постоянная передачи), то матрица рассеяния отрезка кабеля с оконечными устройствами будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \hat{S}_{11} &= S'_{11} + \frac{S'_{12}S'_{21}S'''_{11}e^{-2\gamma l}}{1 - S'_{22}S'''_{11}e^{-2\gamma l}} ; \\ \hat{S}_{12} &= \frac{S'_{12}S'''_{12}e^{-\gamma l}}{1 - S'_{22}S'''_{11}e^{-2\gamma l}} ; \\ \hat{S}_{21} &= \frac{S'_{21}S''_{21}e^{-\gamma l}}{1 - S'_{22}S'''_{11}e^{-2\gamma l}} ; \\ \hat{S}_{22} &= S''''_{22} + \frac{S'''_{12}S'''_{21}S'_{22}e^{-2\gamma l}}{1 - S'_{22}S'''_{11}e^{-2\gamma l}} . \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

Для вычисления собственного затухания отрезка кабеля выражение (6.17) подставим в (6.15). Матричный элемент \hat{S}_{11} всегда довольно

просто измерить, поэтому его не раскрываем. Получим

$$A_{cy} = 10 \lg \frac{1 - |\hat{S}_{11}|^2}{\left| \frac{S'_{21} S'''_{21} e^{-\gamma l}}{1 - S'_{22} S'''_{11} e^{-2\gamma l}} \right|^2}. \quad (6.18)$$

Обычно добиваются хорошего согласования соединительных устройств. При этом $\underline{S}_{11} \ll 1$, $\underline{S}_{22} \ll 1$ и, следовательно, $|S'_{22} S'''_{11} e^{-2\gamma l}| \ll 1$. С этим допущением перепишем предыдущее выражение:

$$A_{cy} = 10 \lg \frac{1 - |\hat{S}_{11}|^2}{|S'_{21} S'''_{21} e^{-\gamma l}|^2}.$$

Подставим сюда значение $\gamma = \alpha + j\beta$ и, произведя необходимые преобразования, получим выражение для собственного затухания составного узла (в децибелах):

$$A_{cy} = A_c + 10 \lg \frac{1 - |\hat{S}_{11}|^2}{|S'_{21} S'''_{21}|^2}. \quad (6.19)$$

Эквивалентная схема в виде каскадного соединения двухплечих узлов получена для таких концевых армирующих устройств, внутренняя структура которых полагается неизвестной. Выражение $10 \lg \frac{1 - |\hat{S}_{11}|^2}{|S'_{21} S'''_{21}|^2}$ есть та величина, на которую собственное затухание A_{cy} узла больше собственного затухания кабеля.

Чаще всего потери в соединителях пренебрежимо малы ($S'_{21} \approx S'''_{21} \approx 1$), и тогда выражение для собственного затухания составного узла (6.19) приобретает вид

$$A_{cy} = A_c + 10 \lg (1 - |\hat{S}_{11}|^2) \quad (6.20)$$

(\hat{S}_{11} – коэффициент отражения на входе отрезка кабеля в том случае, когда выход отрезка согласован).

6.3. МЕТОДИКИ НАХОЖДЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ЗАТУХАНИЯ

Полосовая методика. Измерения затухания кабелей на одной частоте традиционны [1, 2], но дают увеличенную погрешность из-за неопределенности фазы коэффициента отражения на конкретной частоте. Разработанные в последнее время полосовые методы измерения с качанием частоты позволяют частично избавиться от указанного недостатка.

Типовая схема для измерения затухания с качанием частоты представлена на рис. 6.6. Установки конструируются и настраиваются таким обра-

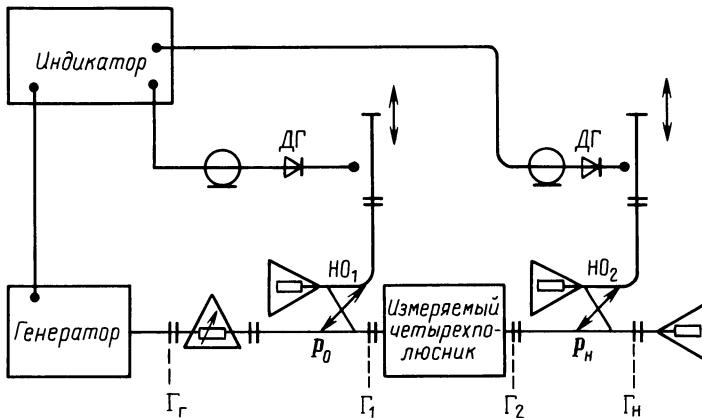


Рис. 6.6. Структурная схема широкополосной установки для измерения затухания (с качанием частоты)

зом, чтобы коэффициенты отражения $\Gamma_r = \Gamma_n \approx 0$ и выходная мощность $P_0 = \text{const}$ (условия, принятые выше). Генератор автоматически изменяет (качет) частоту сигнала, схема автоматической регулировки мощности (АРМ) с направленным ответителем падающей волны поддерживает мощность на входе P_0 постоянной. На экране индикатора наблюдается кривая прошедшего сигнала $P_n(f)$, а с помощью отсчетного устройства считывается его величина. Отсчет производится непосредственно в единицах затухания. Ясно, что в данном случае измеряется вносимое затухание. Погрешности измерения этим методом рассмотрены в [85].

Чаще всего, как это показано в § 6.2, отрезок кабеля может быть представлен в виде однородной линии с двумя концевыми нерегулярностями. Тогда вносимое затухание

$$A_{vn} = A_c + 10 \lg \frac{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2(\alpha + j\beta)l}|^2}{(1 - |\Gamma_1|^2)(1 - |\Gamma_2|^2)}, \quad (6.21)$$

где A_c – собственное затухание кабеля; Γ_1, Γ_2 – коэффициенты отражения входной и выходной нерегулярностей; α – коэффициент затухания; β – коэффициент фазы; l – длина кабеля.

Фазовый множитель $e^{-2j\beta l}$, как указано в § 6.2, меняет значение добавки в пределах от минимальной до максимальной. Следовательно, при качании частоты в полюсе, где βl меняется не менее чем на $\pi/2$, индикатор будет показывать все значения A_{vn} – от максимального до минимального.

Принимая $\Gamma_1 = \Gamma_2$, запишем выражение для минимальной и макси-

мальной добавок:

$$\left. \begin{aligned} \Delta A_{\min} &= 20 \lg \frac{1 - |\Gamma|^2 e^{-2\alpha l}}{1 - |\Gamma|^2} ; \\ \Delta A_{\max} &= 20 \lg \frac{1 + |\Gamma|^2 e^{-2\alpha l}}{1 - |\Gamma|^2} . \end{aligned} \right\} \quad (6.22)$$

Учитывая, что для однородного отрезка $A_c = \alpha l$, запишем выражения для минимального и максимального значений вносимого затухания:

$$A_{\text{вн min}} = A_c + 20 \lg \frac{1 - |\Gamma|^2 e^{-2A_c}}{1 - |\Gamma|^2} ; \quad (6.23)$$

$$A_{\text{вн max}} = A_c + 20 \lg \frac{1 + |\Gamma|^2 e^{-2A_c}}{1 - |\Gamma|^2} . \quad (6.24)$$

Из измерений в полосе частот может быть определено $A_{\text{вн min}}$ и $A_{\text{вн max}}$. Так как уравнение (6.23) является трансцендентным, был выполнен расчет на ЭВМ и построены зависимости $(A_{\text{вн min}} - A_c) = f(A_{\text{вн min}})$ при заданном r (КСВ). Эти зависимости приводятся на рис. 6.7. Они позволяют при измерении величин $A_{\text{вн min}}$ и r определить A_c и Γ . Это и составляет существо полосовой методики. Из рис. 6.7 видно, что при хорошем согласовании разница между $A_{\text{вн min}}$ и A_c становится незначительной.

Фазовый множитель в выражении для вносимого затухания (6.21) $e^{-j2\beta l}$ показывает, что при заданной длине линии с изменением β или частоты (что в данном случае то же самое) добавка к собственному зату-

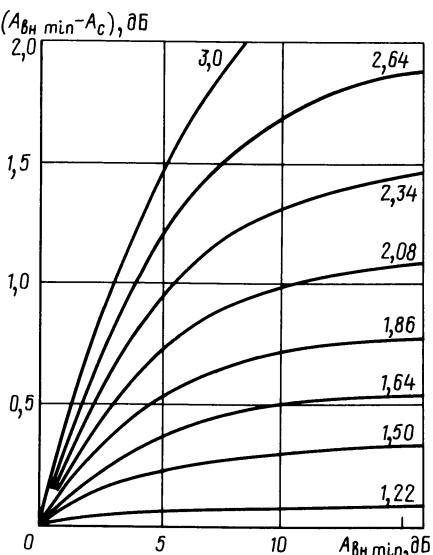


Рис. 6.7. Разность между измеряемым минимальным затуханием и собственным затуханием кабеля в зависимости от измеряемого минимального затухания кабеля при различных значениях КСВ

ханию меняется по гармоническому закону. При этом она достигает минимального и максимального значений при $e^{-j2\beta l} = +1$ и $e^{-j2\beta l} = -1$ соответственно.

Следовательно, добавка будет минимальной при $\beta l = n\pi$ и максимальной при $\beta l = \pi n + \frac{\pi}{2}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$.

Если учесть, что $\beta = 2\pi f \xi / c$ (где f – частота; ξ – коэффициент укорочения волны в кабеле; c – скорость света), то частоты, на которых будет наблюдаться минимум и максимум потерь, следующие:

$$f_{\min} = \frac{nc}{2\xi l}; \quad f_{\max} = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)c}{2\xi l}. \quad (6.25)$$

Интервал между двумя соседними минимумами или максимумами составляет

$$\Delta f = \frac{c}{2l\xi}. \quad (6.26)$$

Необходимо выбирать длину кабеля и полосу качания таким образом, чтобы иметь возможность оценить хотя бы два-три минимума затухания. Уточнение A_c производится по графику (рис. 6.7).

Разностная методика. Иногда требуется найти затухание кабеля, помещенного в специфические условия – в криостат, в камеру тепла и холода, в трубу и т.п. Возникающие в таких случаях трудности можно преодолеть, применив измерение затухания не одного, а двух отрезков разной длины, но с идентичными оконечными устройствами. Если добиться того, чтобы качество заделки соединителей было одинаковым в обоих случаях, то методика измерений оказывается более простой и точной, чем при измерении одного отрезка.

Подставляя (6.17) в (6.15) (§ 6.2), запишем полные выражения для собственного затухания двух отрезков линии – длинного (*) и короткого (**):

$$A_c^* = 10 \lg \left\{ \frac{1 - \left| S'_{11} + \frac{S'_{12} S'_{21} S'''_{11} e^{-2\gamma l_1}}{1 - S'_{22} S'''_{11} e^{-2\gamma l_1}} \right|^2}{\left| \frac{S'_{21} S'''_{21} e^{-\gamma l_1}}{1 - S'_{22} S'''_{11} e^{-2\gamma l_1}} \right|^2} \right\}; \quad (6.27)$$

$$A_c^{**} = 10 \lg \frac{1 - \left| S'_{11} + \frac{S'_{12} S'_{21} S'''_{11} e^{-2\gamma l_2}}{1 - S'_{22} S'''_{11} e^{-2\gamma l_2}} \right|^2}{\left| \frac{S'_{21} S'''_{21} e^{-\gamma l_2}}{1 - S'_{22} S'''_{11} e^{-2\gamma l_2}} \right|^2};$$

где l_1 и l_2 – длины длинного и короткого отрезков.

Учитывая, что обычно $S'_{22} \ll 1, S'''_{11} \ll 1$, и $|e^{-2\gamma l}| = e^{-2\alpha l} < 1$, упростим (6.27):

$$\left. \begin{aligned} A_c^* &= 10 \lg \frac{1 - |S'_{11} + S'_{12} S'_{21} S'''_{11} e^{-2\gamma l_1}|^2}{|S'_{21} S'''_{21} e^{-\gamma l_1}|^2}; \\ A_c^{**} &= 10 \lg \frac{1 - |S'_{11} + S'_{12} S'_{21} S'''_{11} e^{-2\gamma l_2}|^2}{|S'_{21} S'''_{21} e^{-\gamma l_2}|^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6.28)$$

Вычтем из первого второе и получим затухание разностной части:

$$A_c^* - A_c^{**} = \alpha(l_1 - l_2) + 10 \lg \frac{1 - |S'_{11} + S'_{12} S'_{21} S'''_{11} e^{-2\gamma l_1}|^2}{1 - |S'_{11} + S'_{12} S'_{21} S'''_{11} e^{-2\gamma l_2}|^2}. \quad (6.29)$$

При хорошем согласовании числитель и знаменатель правого члена выражения (6.29) мало различаются, и тогда искомое затухание находится просто:

$$A_c^* - A_c^{**} = \alpha(l_1 - l_2). \quad (6.30)$$

Отсюда ясна процедура нахождения собственного затухания кабеля как разницы собственных затуханий двух измеряемых отрезков.

На практике методику удобно реализовать следующим образом. Берут короткий отрезок кабеля, идентичного испытуемому, и заделывают на него соединители. Производят измерение собственного затухания отрезка, фиксируя S'_{11} (входной коэффициент отражения). Затем на испытуемый отрезок кабеля заделывают те же соединители и производят измерение его собственного затухания. Искомое затухание кабеля находят как разность второго и первого значений собственного затухания.

Разностно-полосовая методика. Процедура определения собственного затухания двух отрезков кабеля при применении разностного метода

является достаточно трудоемкой. Имея в своем распоряжении установку с качанием частоты, можно не производить измерение собственного затухания. Достаточно измерить минимальное значение вносимого затухания двух отрезков кабеля в полосе частот, а затем взять разность этих величин.

Рассмотрим эту операцию для эквивалентной схемы в виде линии с двумя концевыми нерегулярностями. Тогда, как показано выше, минимальное вносимое затухание в полосе частот для длинного и короткого отрезков соответственно (§ 6.2):

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{вн мин}}^* &= A_c^* + 20 \lg \frac{1 - |\Gamma|^2 e^{-2A_c^*}}{1 - |\Gamma|^2} ; \\ A_{\text{вн мин}}^{**} &= A_c^{**} + 20 \lg \frac{1 - |\Gamma|^2 e^{-2A_c^{**}}} {1 - |\Gamma|^2} . \end{aligned} \right\} \quad (6.31)$$

Вычитая из первого второе и имея в виду, что $A_c = \alpha l$, получаем разностное вносимое затухание:

$$A_{\text{вн разн}} = \alpha(l_1 - l_2) + 20 \lg \frac{1 - |\Gamma|^2 e^{-2\alpha l_1}}{1 - |\Gamma|^2 e^{-2\alpha l_2}} . \quad (6.32)$$

Таким образом, получаем, что разность двух вносимых минимальных в полосе частот затуханий дает нам собственное затухание разностной длины кабеля с некоторой добавкой, очень мало отличающейся от нуля. В практике эту добавку, как правило, можно не учитывать. Последний прием использовался при измерениях затухания сверхпроводящих коаксиальных кабелей [86], отличающихся малым затуханием и значительной нерегулярностью.

Отметим, что как выражения для затухания отрезка коаксиального кабеля (§ 6.2), так и приемы выделения собственного затухания из вносимого (§ 6.3) носят более общий характер и могут быть использованы в приложении к отрезкам других линий передачи, таких, например, как полые волноводы, однопроводные волноводы, диэлектрические волноводы, двухпроводные линии.

6.4. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ

Один из наиболее часто измеряемых параметров радиочастотных кабелей — коэффициент затухания. При конструировании радиотехнических систем необходимо знать возможное ослабление сигнала в кабельном тракте на тех частотах, на которых работает разрабатываемое устройство. В последнее время распространилось подробное паспорти-

рование конкретного вида кабелей в заданной полосе частот, направленное на повышение характеристик всей системы.

Для измерений параметров четырехполюсников в полосе частот промышленностью выпускаются панорамные широкополосные высокочастотные измерительные приборы. Следует заметить, что при их разработке практически не учтены особенности измерений параметров радиочастотных кабелей. Тем не менее панорамные установки широко применяются на всех стадиях разработки и эксплуатации радиочастотных кабелей.

Приборы для измерений параметров элементов и трактов с распределенными постоянными подробно описаны в [80], а измерение на них характеристик радиочастотных кабелей — в [1, 2, 13]. В [13] наибольшее внимание уделено измерениям частотных характеристик отражения, фазотемпературных и фазочастотных. Ниже мы рассмотрим в основном измерение частотной зависимости коэффициента затухания.

В табл. 6.1 приведены характеристики некоторых панорамных установок последних выпусков, наиболее пригодных для измерений парамет-

Таблица 6.1. Параметры панорамных измерителей

Тип прибора	Измерительный тракт, мм	Диапазон частот, ГГц	Измеряемое затухание, дБ	Измеряемый КСВ
P 2-54/1	7/3	3,2–5,64	30	1,07–5
P 2-54/2	7/3	5,6–8,3	35	1,06–5
P 2-54/3	7/3	8,15–12,05	35	1,06–5
P 2-54/4	7/3	4,0–12,05	30	1,1–5
P 2-73	3,5/1,5; 7/3; 16/7; 16/4,6	0,01–1,25	50	1,07–5 1,03–5 1,03–5
P 2-78	3,5/1,5; 7/3; 16/7; 16/4,6	1,25–5,0	50	1,07–5 1,04–5 1,1–5
P 2-83	3,5/1,5; 7/3	0,1–18	40	1,1–5 1,07–5
P 2-86	3,5/1,5; 7,3	0,1–6	50	1,07–5 1,03–5
P 2-98	16/4,6	0,01–2,14	40	1,05–5
P 2-100	16/7	0,01–2,14	50	1,05–5
P 2-101	7/3	2,0–5,0	40	1,05–5
P 2-102	7/3	0,01–2,14	50	1,03–5
P 2-103	7/3	2,0–8,3	50	1,05–5
P 2-104	7/3	8,15–18	35	1,07–5
P 2-105	7/3	2,0–18	35	1,07–5
P 2-106	3,5/1,5	0,01–2,14	40	1,05–5
P 2-107	3,5/1,5	2,0–8,3	40	1,07–5
P 2-108	3,5/1,5	8,15–18	35	1,1–5
P 2-109	3,5/1,5	2,0–18	35	1,1–5

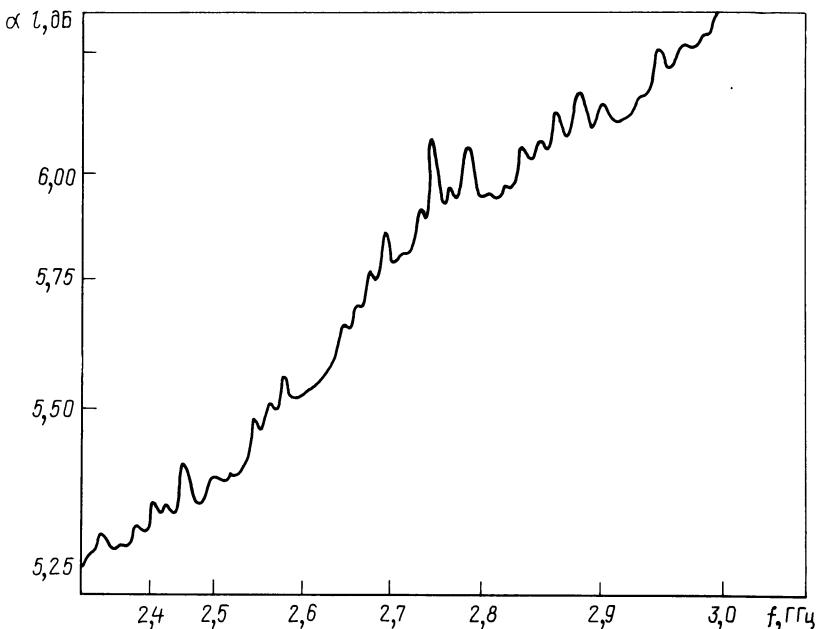


Рис. 6.8. Экспериментальная зависимость затухания для образца радиочастотного кабеля

ров радиочастотных кабелей [87]. Как видно из табл. 6.1, отечественной промышленностью выпускаются приборы для измерений параметров коаксиальных трактов в полосе частот от 10 МГц до 18 ГГц. Они имеют (с соединителями канала 7/3 мм) следующие основные характеристики: пределы измерения затухания 0–35 дБ;

погрешность измерения $(0,05+0,05 A_x)$ дБ, где A_x – измеряемое затухание.

Принцип работы панорамных приборов состоит в следующем (см. рис. 6.6). Генератор измерительного сигнала изменяет (свипирует) его частоту в заданном диапазоне. Модулированные сигналы падающей и прошедшей волн при измерении затухания (или падающей и отраженной волн при измерении отражения) выделяются двумя направленными ответвителями (НО), детектируются детекторными головками (ДГ) и поступают на индикатор. Уровень падающей волны с помощью устройства автоматической регулировки поддерживается в необходимых пределах, а сигнал прошедшей волны после обработки поступает на синхронный детектор и высвечивается на экране индикатора. Сигнал прошедшей волны сравнивается по уровню с калиброванным напряжением постоянного тока. Вид кривой затухания показан на рис. 6.8. Измерив

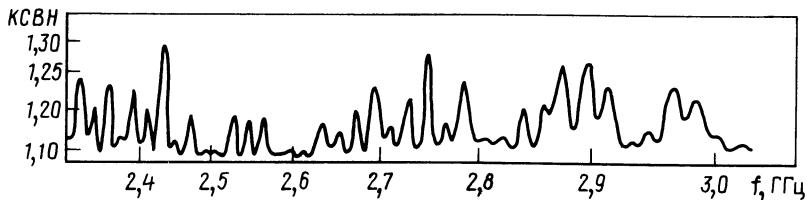


Рис. 6.9. Экспериментальная зависимость КСВ для образца радиочастотного кабеля

значение вносимого затухания, вычисляют собственное затухание (см. § 6.3) кабеля и делят на его длину. Таким образом находят коэффициент затухания для конкретного кабеля в заданной частотной области.

На рис. 6.9 показан характерный вид сигнала отраженной волны при измерении на панорамном приборе кабеля, график затухания которого представлен на рис. 6.8. Кривая на экране имеет резонансные пики, связанные по частоте и амплитуде с периодом и значением квазипериодических нерегулярностей волнового сопротивления кабеля. Измерения коэффициента отражения радиочастотных кабелей подробно описаны в [13].

Особенности измерений радиочастотных кабелей. Ранее мы отмечали, что в панорамных приборах не полностью учтены особенности измерения параметров радиочастотных кабелей. Например, частотная характеристика затухания и отражения длинномерных объектов имеет резкую изрезанность (см. рис. 6.8 и 6.9), т.е. полоса частот продетектированного сигнала является широкой. В то же время выпускаемые индикаторы рассчитаны на измерение параметров четырехполюсников, обладающих плавной частотной характеристикой [80], и по этой причине имеют узкую (не вмещающую спектр сигнала) полосу пропускания, недостаточную для измерений характеристик радиочастотных кабелей.

Высокочастотные узлы панорамных установок сконструированы таким образом, что к ним трудно подключать измеряемый кабель. Ряд других особенностей (способ калибровки установок с отключением измеряемого объекта, недостаточно длинные кабели к направленным ответителям падающей и отраженной волн и др.) свидетельствует о том, что панорамные приборы сконструированы без учета особенностей измерения на них радиочастотных кабелей. Принципиальным для измерений длинных кабелей является и неудачный выбор частоты модуляции измерительного сигнала. Рассмотрим погрешности измерений, связанные с этой особенностью приборов.

В большинстве отечественных автоматических измерителей затухания и отражения на измерительный объект подаются высокочастотные колебания, модулированные прямоугольными импульсами (меандром) частотой 100 кГц. Этот прием позволяет измерять характеристики объекта путем сравнения напряжений, пропорциональных прошедшей

(отраженной) и падающей мощностям на частоте модуляции. Применение модуляции при использовании в схеме сравнения синхронного детектора обеспечивает большой динамический диапазон и точность измерений, если измеряемый объект короткий по сравнению с длиной импульса и его частотная характеристика сравнительно гладкая.

Радиочастотные кабели длиной 100 м и более в данном случае уже нельзя считать короткими объектами. К тому же при малых затуханиях их характеристики бывают сильно изрезанными из-за нерегулярностей. Поэтому измерения на приборах с модуляцией приводят к искажению формы получаемых частотных характеристик и погрешностям в определении абсолютных величин затухания и отражения.

Остановимся вначале на искажениях формы кривых. Модулирующий сигнал при этом можно считать гармоническим, с частотой, равной основной частоте меандра, поскольку прочие спектральные составляющие импульсов модуляции в дальнейшем отфильтровываются и не влияют на результат. В этом случае модулированный сигнал, подаваемый на вход кабеля, представляет собой сумму трех колебаний (начальные фазы будем считать нулевыми) [88] :

$$u_{\text{вх}} = U_0 \left[\cos \omega t + \frac{M}{2} \cos (\omega - \Omega) t + \frac{M}{2} \cos (\omega + \Omega) t \right], \quad (6.33)$$

где ω – круговая частота исходных колебаний; Ω – круговая частота модуляции; M – глубина модуляции.

После детектирования устройством с квадратичной характеристикой выделяется сигнал $u_{\text{вх}}^2$, пропорциональный $M \cos \Omega t$ с частотой модуляции; остальные образующиеся при этом колебания отфильтровываются. Если на такой детектор поступает сигнал, прошедший через кабель или отразившийся в нем, выделяется сигнал u_x^2 , пропорциональный $k_0 \left(\frac{k_{\text{л}} + k_{\text{п}}}{2} \right) M \cos \Omega t$, где $k_0, k_{\text{л}}, k_{\text{п}}$ – модули коэффициентов передачи или отражения кабеля на частотах соответственно ω , $\omega - \Omega$, $\omega + \Omega$. Если изрезанность частотной характеристики кабеля слабая, $k_0 \approx k_{\text{л}} \approx k_{\text{п}}$, то $u_x/u_{\text{вх}} = k_0$, т.е. сравнение сигналов прошедшей (отраженной) и падающей волн дает правильное значение затухания (отражения) кабеля на данной частоте.

Если же изрезанность сильная, $k_0 \neq k_{\text{л}} \neq k_{\text{п}}$, то $\frac{u_x}{u_{\text{вх}}} = \sqrt{k_0 \left(\frac{k_{\text{л}} + k_{\text{п}}}{2} \right)}$, т.е. результат измерения, приписываемый при этом центральной частоте ω , зависит также от коэффициентов передачи (отражения) на боковых частотах $\omega - \Omega$ и $\omega + \Omega$.

Рассмотрим влияние этого эффекта на искажение формы пика на кривой коэффициента отражения для кабеля с периодическими нерегулярностями, когда затуханием можно пренебречь. Выражение для формы

пика можно получить преобразуя формулу (3.40) из [13] к виду

$$|\Gamma_{bx}| = p_0 \frac{(1 + \Delta F)}{\Delta F (1 + \Delta F/2)} |\sin(\pi m \Delta F)|, \quad (6.34)$$

где $p_0 = \Delta Z / 2Z$ — амплитуда нерегулярности; m — число нерегулярностей в кабеле; $\Delta F = (f - f_{рез}) / f_{рез}$ — относительное отклонение частоты от резонансной.

Это выражение дает значение k_0 — коэффициента отражения на центральной частоте. Вводя коэффициент $k = f_{\text{мод}} / f_{\text{рез}}$, получаем коэффициенты отражения для боковых частот

$$|\Gamma_{bx}| \left(\frac{f - f_{\text{мод}}}{f + f_{\text{мод}}} \right) = p_0 \frac{1 + \Delta F \mp k}{(\Delta F \mp k) \left(1 + \frac{\Delta F \mp k}{2} \right)} |\sin \pi m (\Delta F \mp k)|, \quad (6.35)$$

где знак “—” соответствует $k_{\text{л}}$, коэффициенту на нижней частоте, знак “+” — соответственно $k_{\text{п}}$, коэффициенту на верхней частоте.

Полученные выражения позволяют вычислить форму резонансного пика отражения, какой она будет на экране, и оценить получающиеся при этом искажения.

В резонансе относительное уменьшение измеренного коэффициента отражения по сравнению с истинным составит

$$\frac{|\Gamma_{bx}|_{\text{макс изм}}}{|\Gamma_{bx}|_{\text{макс}}} = \sqrt{\frac{1 - k^2/2}{1 - k^2/4}} \frac{|\sin(\pi m k)|}{\pi m k}. \quad (6.36)$$

Отсюда следует, что искажение резонансного пика определяется в основном произведением km :

$$km = \frac{f_{\text{мод}}^2 \xi l}{c}, \quad (6.37)$$

где ξ — коэффициент укорочения длины волны для данного кабеля; c — скорость света.

Для частоты модуляции 100 кГц и $\xi = 1,41$

$$km = \frac{1}{1064} l, \quad (6.38)$$

где l — длина кабеля в метрах.

Большие искажения формы пика возникают при длинах кабеля в сотни метров. Были выполнены расчеты искажения формы резонансного пика отражения при $km = 0,5$ ($l \approx 500$ м). Амплитуда пика снижается

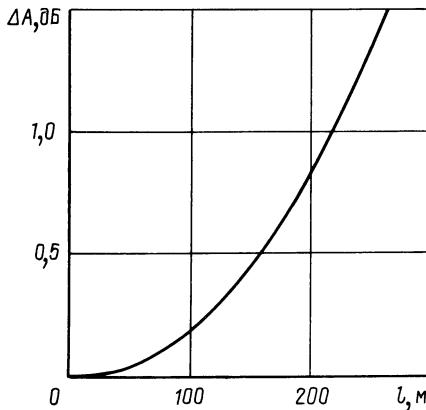


Рис. 6.10. Добавка к затуханию из-за модуляции измерительного сигнала в зависимости от длины измеряемого отрезка радиочастотного кабеля

при этом на 36%, добротность — на 12%. При $km=1$ ($l \approx 1000 \text{ м}$) измеренный коэффициент отражения на резонансной частоте будет равен нулю, т.е. частотная характеристика кабеля исказится незнаваемо.

Можно сделать вывод, что на приборах с модуляцией, без значительных искажений формы кривой затухания и отражения, можно измерять характеристики кабелей длиной до 50–100 м.

Второй причиной, приводящей к погрешностям при измерениях частотных характеристик кабелей и связанной с модуляцией, является наличие в схеме измерения синхронного детектора, чувствительного к сдвигу фазы между измеряемым и опорным сигналами на частоте модуляции. Как следует из [88], при наличии такого сдвига фазы возникает добавка к измеряемому затуханию:

$$\Delta A = 10 \log (|\cos \Delta\varphi|), \quad (6.39)$$

где $\Delta\varphi$ — сдвиг фазы модулирующих колебаний за время прохождения сигнала по кабелю. Он составляет

$$\Delta\varphi = 2\pi\xi f_{\text{мод}} l / c, \quad (6.40)$$

при $f_{\text{мод}} = 100 \text{ кГц}$; $\xi = 1,41$; $\Delta\varphi \approx 3 \cdot 10^{-3} l \text{ рад}$, где l — длина кабеля в метрах.

На рис. 6.10 показана погрешность измерения затухания на приборах с частотой модуляции 100 кГц в зависимости от длины кабеля. Эта погрешность становится заметной при длинах кабеля более 100 м, а при длинах более 500 м затухание на таких приборах вообще невозможно измерить.

При измерении затухания длинных кабелей с малыми потерями, имеющих пики на частотной характеристике, должны наблюдаться искажения формы пиков, аналогичные рассмотренным выше для коэффициента отражения. В свою очередь, на результат измерения коэффициента отражения влияет сдвиг фазы модуляции на синхронном детекторе, хотя точно оценить погрешность в этом случае сложно.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что при измерении частотных характеристик длинных кабелей с малыми потерями предпочтительно использовать приборы без модуляции. При использовании приборов с модуляцией следует учитывать возникающие при этом погрешности.

Автоматизация измерений. В последние годы [80] появились приборы для измерения характеристик цепей с распределенными постоянными, в которые встроены управляющие микропроцессоры. Они позволяют резко ускорить и упростить процесс измерений, повысить их точность, а также дают возможность перейти к автоматическому оформлению измерительной документации (протокола). Встроенный микропроцессор осуществляет управление большинством органов измерительной установки, автоматически настраивает прибор, вычисляет и уменьшает погрешность измерений, делает более простым пользование измерительной системой. МикроЭВМ позволяет управлять установкой дистанционно, через специальный интерфейс или через сеть коллективного пользования. Микропроцессорная техника обеспечивает автоматическую печать протокола, а также ввод данных в информационно-измерительную систему более высокого уровня.

Структурная схема автоматизированной установки для измерений коэффициентов затухания и отражения радиочастотных кабелей показана на рис. 6.11. Панорамная широкополосная высокочастотная аппаратура соединяется с помощью шины сопряжения (интерфейса) с микроЭВМ, которая и обрабатывает измерительную информацию. В программе, вводимой в ЭВМ, обычно предусматривается установка верхней и нижней частот диапазона, пределов измерений, расчет и печать результатов в виде протокола.

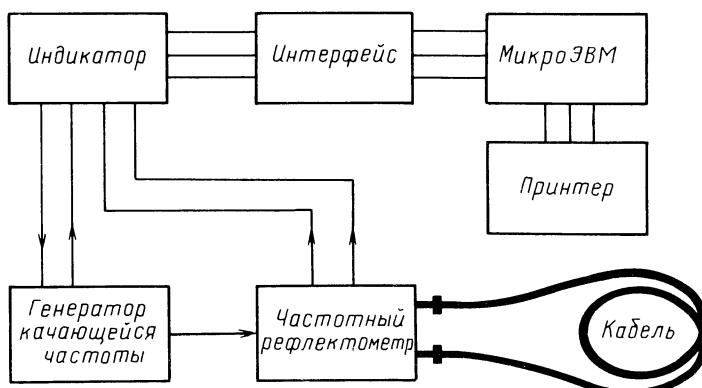


Рис. 6.11. Структурная схема автоматизированной установки для измерений параметров радиочастотных кабелей в широком диапазоне частот

При сопряжении с высокопроизводительной микроЭВМ возможности измерений резко расширяются. Кроме автоматической калибровки измерительного прибора и коррекции результатов реализуется оптимальный алгоритм измерений с выдачей команд об очередных операциях. Ввод программы и работа по ней возможны и операторами.

6.5. ИМПУЛЬСНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ПО ДЛИНЕ

К самым мощным методам изучения внутренней структуры и параметров радиочастотных кабелей относится импульсная рефлектометрия – зондирование кабеля по длине короткими импульсами. Принцип измерений подобен радиолокационному. Он состоит в посыпке нано- или пикосекундных импульсов в кабель с последующим измерением характеристик сигнала, отраженного от нерегулярностей. Импульсы, отраженные внутри кабеля, смешены по времени относительно зондирующих, что дает возможность измерять расстояние до нерегулярностей [89].

Работа рефлектометра состоит в следующем (рис. 6.12). Импульс от генератора поступает на вход исследуемого кабеля через смеситель. Нерегулярности, имеющиеся в кабеле или тракте, вызывают отражение сигнала ко входу, где отраженные импульсы выделяются смесителем и накладываются на зондирующий импульс. В результате на экране прибора появляется кривая отраженного сигнала в виде впадин и всплесков калибровочной линии.

Повышение или понижение уровня этой линии связано с фазой отраженного сигнала относительно исходного. Локальные увеличения волнового сопротивления и индуктивные дефекты вызывают поднятие кривой на экране рефлектометра; уменьшения волнового сопротивления и емкостные дефекты ведут к ее опусканиям.

При полном согласовании всего тракта (что невозможно) коэффициент отражения был бы равен нулю и кривая на экране рефлектометра совпадала бы с калибровочной. Короткое замыкание или холостой ход

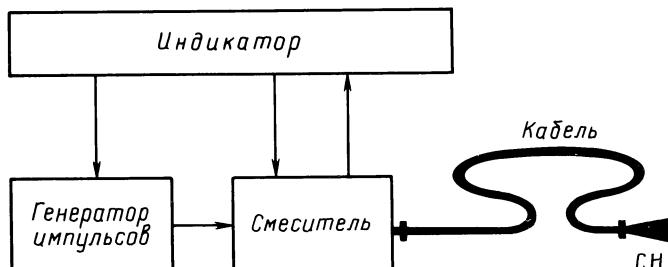


Рис. 6.12. Структурная схема импульсного рефлектометра

вызывают полное отражение зондирующего импульса ко входу тракта, и отраженный сигнал после этих дефектов на рефлектограмме не наблюдается.

Расстояние до нерегулярности или дефекта определяется следующим образом:

$$l_x = \frac{1}{2} t v, \quad (6.41)$$

где l_x – измеряемое расстояние; t – время запаздывания отраженного импульса; v – скорость распространения сигнала по кабелю. Обычно в рефлектометре этот пересчет делается автоматически и на шкалу или отсчетный лимб прибора наносится непосредственно расстояние до нерегулярности в метрах или дециметрах.

Зондирующий импульс, проходя по кабелю, из-за потерь и отражений уменьшается по амплитуде и "расплывается". Измеряя параметры импульса в зависимости от пройденного расстояния, можно оценить величину затухания кабеля. Далее, измерив время передачи импульса через отрезок линии известной длины, получим скорость распространения сигнала по кабелю или коэффициент укорочения длины волны.

Точное измерение времени запаздывания отраженного импульса относительно зондирующего часто выполняют с помощью калиброванной линии задержки. В качестве точной линии задержки, как правило, используется отрезок прецизионного радиочастотного кабеля полужесткой конструкции. В комплекте импульсных рефлектометров или стробоскопических осциллографов такие устройства обычно имеются.

В современных рефлектометрах в качестве зондирующих применяются импульсы двух типов:

прямоугольный с коротким фронтом длительностью в десятки–сотни пикосекунд и вершиной в сотни наносекунд–единицы микросекунд;

колоколообразный с длительностью в единицы – сотни микросекунд.

Оба типа зондирующих импульсов имеют свои преимущества и недостатки: прямоугольный описывает на экране рефлектометра профиль волнового сопротивления вдоль кабеля; колоколообразный дает не само волновое сопротивление, а его производную по длине. Обычно для зондирования длинных и со значительным затуханием кабелей используют колоколообразный импульс, а качественные короткие тракты исследуют с помощью прямоугольного импульса.

На экране рефлектометра с прямоугольным импульсом кривая коэффициента отражения индицируется в соответствии с расстоянием вдоль испытываемого кабеля, что равносильно изображению профиля волнового сопротивления по длине. Поэтому иногда такую рефлектограмму называют профилограммой волнового сопротивления кабеля. Фактически рефлектометр дает возможность визуально (с одного взгляда) оценить характер, величину и местонахождение основных не-

регулярностей, т.е. произвести быструю и качественную диагностику кабеля.

При зондировании длинного отрезка кабеля возникает проблема, заключающаяся в том, что точное измерение коэффициента отражения вдали от входа представляется затруднительным. Связано это с тем, что затухание кабеля уменьшает амплитуду как падающего, так и отраженного импульсов. Чтобы получить действительную величину коэффициента отражения, нужно внести соответствующую поправку. Способы вычисления поправочных коэффициентов даются в инструкциях по эксплуатации, прилагаемых к рефлектометрам.

Во время эксплуатации радиочастотных кабелей обычно достаточно определить тип повреждения и его местонахождение, т.е. описанные выше подробные измерения не требуются. В подобных случаях импульсный рефлектометр просто незаменим.

Разрешающая способность и точность. В рефлектометрии важно различать разрешающую способность и точность. Разрешающая способность показывает, как близко могут быть расположены две нерегулярности, чтобы прибор еще не воспринял их как одну. Она определяется крутизной фронта зондирующего импульса и затуханием измеряемого кабеля. Так как длительность фронта импульса увеличивается при распространении по кабелю, разрешающая способность рефлектометра с увеличением длины кабеля падает. Она в большой мере зависит от типа испытываемого кабеля. В настоящее время достигнуты разрешающие способности менее 1 см.

При измерениях длинных кабелей крутизна фронта отраженного импульса определяется практически только кабелем и изменяется пропорционально квадрату его длины.

Под точностью рефлектометра понимают погрешность прибора, которую он обеспечивает при измерениях коэффициента отражения и расстояния до нерегулярности. Достигнутые точности измерения коэффициента отражения составляют $\pm 5\%$, но эта цифра в большой степени зависит от метода измерений и квалификации измерителя. Например, использование эталонных коаксиальных кабелей позволяет повысить точность измерения коэффициента отражения и волнового сопротивления не менее чем в два раза [89].

Погрешность при измерении расстояния до нерегулярности определяется временной стабильностью и линейностью рефлектометра. Обычно эта погрешность составляет $\pm 2\%$ измеряемого расстояния. В большой степени она зависит от того, с какой точностью определена скорость распространения (коэффициент замедления) волны в кабеле. Наиболее частая ошибка при выполнении измерений на рефлектометре — неточное или даже неправильное установление коэффициента замедления.

Рефлектометр измеряет так называемую электрическую длину кабеля. Чтобы получить физическую длину из электрической, необходимо учесть следующие факторы: а) скорость распространения сигнала

в конкретном кабеле; б) изгибы, петли, укрутку; в) температурные изменения длины; г) достижимую точность измерения физической длины кабеля.

Точность, с которой определена скорость распространения волны в данном кабеле, в большой мере влияет на соотношение между электрической и физической длинами. Хотя коэффициент замедления задается в документации на кабели с точностью до 0,5%, реальные однотипные изделия различаются между собой по этому параметру иногда более чем на 2%, приводя к соответствующей погрешности в определении физической длины.

Следующий вид погрешности связан с тем, что кабель в протяженном виде имеет иную длину, чем смотанный в виде бухты. Необходимо учесть и то обстоятельство, что физическая длина кабеля в зависимости от температуры меняется не в той мере, как электрическая. Эти и другие факторы следует учитывать при нахождении физической длины кабеля по результатам измерений электрической длины на рефлектометре. При необходимости точных измерений длины необходимо аккуратно вычислить вносимые погрешности.

Промышленные рефлектометры и их применение. Технические характеристики рефлектометров, выпускаемых отечественной промышленностью, даны в табл. 6.2 [87].

Рефлектометры Р5-11 и Р5-12 удобны для измерений радиочастотных кабелей, обладают небольшими габаритами, массой и получили значительное распространение. Эти приборы могут быть использованы везде, где требуется контроль регулярности волнового сопротивления, обнаружение и выявление характера повреждений кабелей, измерение длины и сопоставление задержки коаксиальных трактов. Кроме того, приборы могут быть использованы для обнаружения мест неисправности (замыкание, обрыв) и в других типах кабелей и линий передачи. Они находят

Таблица 6.2. Параметры импульсных рефлектометров

Основные характеристики	Р 5-11	Р 5-12	Р 5-15
Диапазон измеряемых расстояний, м	0,1–200	1–2000	0–200
Разрешающая способность, м	0,015	0,09	0,01
Вид зондирующего сигнала	Перепад	Импульс, перепад	Импульс, перепад
Время нарастания фронта, нс	0,15	0,9	0,1
Измеряемые коэффициенты отражения	0,001–1	0,002–1	0,001–1
Погрешность измерения коэффициента отражения, %	±5	±7	±5
Волновое сопротивление, Ом	50	50–300	50
Масса, кг	13	—	—

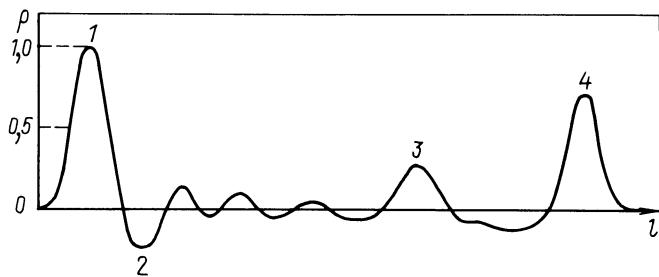


Рис. 6.13. Импульсная рефлектограмма кабеля и ее основные особенности:

1 – входной (зондирующий) импульс; 2 – локальное уменьшение волнового сопротивления (вмятина); 3 – локальное увеличение волнового сопротивления (распушка); 4 – обрыв в кабеле

применение на предприятиях связи, в энергохозяйстве, на заводских сетях и аэродромах для определения точного места повреждения кабелей.

Различные нарушения структуры кабеля прямо связаны с видом отклонений на рефлектограмме. На рис. 6.13 показаны виды отклонений для характерных неисправностей. Вмятина на кабеле дает локальное уменьшение волнового сопротивления, приводящее к "впадине" на рефлектограмме (точка 2). Наоборот, ослабленное прижатие внешнего проводника к изоляции (например, распущение оплетки) ведет к увеличению волнового сопротивления и соответственно к "горбiku" на кривой (точка 3). Крайние формы этих двух типов нерегулярностей – короткое замыкание и обрыв – дают локальные коэффициенты отражения $\rho = -1$ или $+1$ и максимальные отклонения на рефлектограмме соответственно вниз или вверх (в данном случае обрыв – точка 4).

Характерная рефлектограмма, полученная на приборе с колоколообразным импульсом, показана на рис. 6.14. Отклонения, соответствующие нерегулярностям кабеля, носят симметричный характер относительно средней линии. Связано это, как было указано выше, с тем, что рефлектометр с колоколообразным импульсом отображает производную волнового сопротивления. Амплитуда отклонений на рефлектограмме постепенно понижается, так как сказывается затухание кабеля. Чтобы по данной рефлектограмме вычислить производную волнового сопротивления в зависимости от длины, надо воспользоваться поправочным коэффициентом $k = 10^{0,1\alpha l}$, где α – коэффициент затухания, $\text{дБ}/\text{м}$; l – длина кабеля до нерегулярности.

Вид рефлектограммы с прибора Р5-11 дан на рис. 6.15. Общий подъем кривой относительно горизонтальной оси связан со значением сопротивления проводников. Как уже отмечалось, вид рефлектограммы, полученной с помощью прямоугольного импульса, характеризует "рельеф"

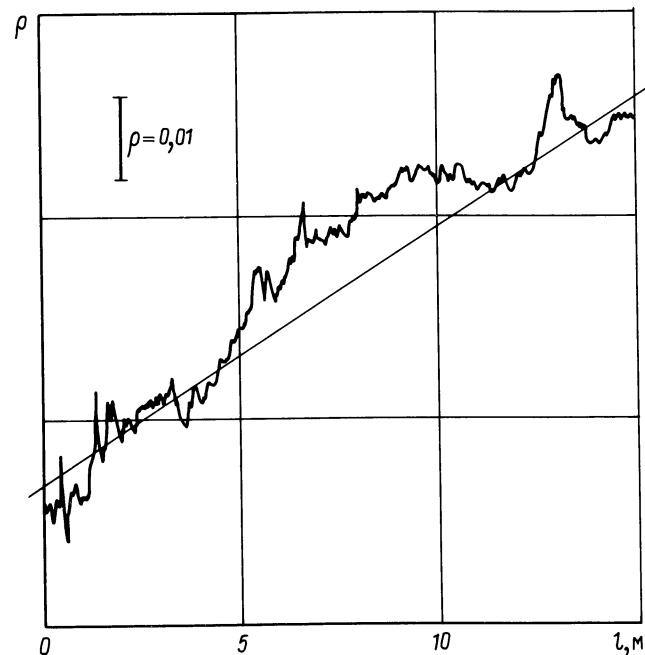
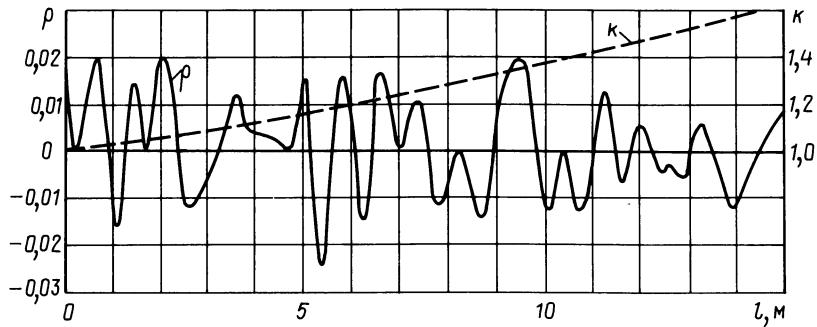


Рис. 6.15. Рефлектометрическая диаграмма (рефлектограмма) при зондировании кабеля прямоугольным импульсом

волнового сопротивления по длине, т.е. рефлектометрическая (после учета ослабления из-за затухания) может служить профилограммой волнового сопротивления. На данной профилограмме видны два типа изменений волнового сопротивления по длине кабеля: плавные, не имеющие выраженного периода (так называемый "тренд"), и быстрые, квазипериодические колебания, в основном определяющие отражения электромагнитной волны при распространении по кабелю.

Измерение волнового сопротивления и его нерегулярности. Основы измерений волнового сопротивления рефлектометрическим методом рассмотрены в [89]. Остановимся лишь на нескольких наиболее общих моментах.

Если напряжение сигнала, посланного в кабель, обозначить через $E_{\text{пад}}$, а напряжение отраженного сигнала через $E_{\text{отр}}$, то локальный коэффициент отражения определится как $\rho = E_{\text{отр}}/E_{\text{пад}}$ в каждом сечении кабеля. Значение коэффициента отражения, вызванного разницей волновых сопротивлений в какой-либо точке кабеля, для достаточно большого класса зондирующих импульсов можно оценить следующим образом:

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} , \quad (6.42)$$

где Z_1 – волновое сопротивление кабеля перед измеряемой нерегулярностью; Z_2 – волновое сопротивление на оцениваемом участке кабеля. Из (6.42) видно, что по знаку коэффициента отражения можно определить характер нерегулярности. Если ρ положительный, то волновое сопротивление на измеряемом участке повышается, если ρ отрицательный, то понижается.

Рефлектометр позволяет выполнять быструю оценку волнового сопротивления измеряемого кабеля и производить измерения среднего на заданной длине значения этого параметра. Если на выходе рефлектометра включить отрезок радиочастотного кабеля с известным волновым сопротивлением (чаще всего $Z_K = 50 \Omega$), то прибор позволяет определить волновое сопротивление измеряемого кабеля следующим образом:

$$Z_{\text{и}} = Z_K \frac{1 + \rho}{1 - \rho} , \quad (6.43)$$

где $Z_{\text{и}}$ – волновое сопротивление измеряемого кабеля; Z_K – волновое сопротивление калибровочного отрезка; ρ – коэффициент отражения, измеренный рефлектометром в месте соединения калибровочного и измеряемого кабелей.

Местная нерегулярность волнового сопротивления может быть определена из зависимости

$$\Delta Z = Z_{\text{ср}} \frac{2\rho}{1 - \rho} , \quad (6.44)$$

где $Z_{\text{ср}}$ – усредненное на участке волновое сопротивление.

Его значение можно определить по формуле

$$Z_{\text{ср}} = \frac{3333 l_3}{C} , \quad (6.45)$$

где l_3 – электрическая длина кабеля, м; C – емкость кабеля, пФ.

6.6. РАДИОЧАСТОТНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ

Эксплуатация радиочастотного кабеля на СВЧ без соединителей невозможна. Радиочастотный кабель становится комплектным изделием только после армирования соединителями (рис. 6.16). Потребителям, пожалуй, более всего интересуют потери энергии при ее передаче, т.е. затухание кабелей. Этой характеристике уделяется наибольшее внимание в соответствующих монографиях [1, 2]. Там же кратко описаны соединители, но без привязки к конструкции радиочастотных кабелей. Значительное место уделено описанию способов измерения коэффициента затухания кабелей в [1, 2, 13], но без учета влияния соединителей. В § 6.2 мы показали необходимость учета этого влияния.

Соединитель радиочастотный коаксиальный представляет собой устройство, предназначенное для механического и электрического соединения и рассоединения коаксиальных радиочастотных кабелей между собой и с радиоэлектронной аппаратурой [90].

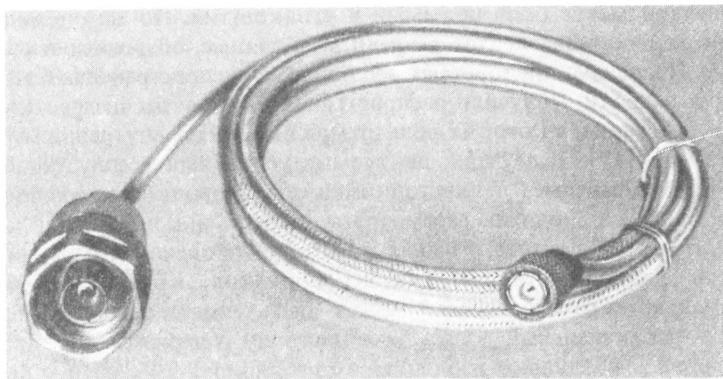


Рис. 6.16. Внешний вид радиочастотного кабеля, армированного коаксиальными соединителями

Основные характеристики соединителей. Чтобы обеспечить наименьшее затухание, соединитель должен иметь такое же волновое сопротивление, как кабель и вся линия в целом, а кроме того, обеспечить минимальное отражение передаваемого сигнала в заданном диапазоне частот. В СССР и за рубежом коаксиальные соединители практически выпускаются только с волновыми сопротивлениями 50 и 75 Ом. Кабели с другими волновыми сопротивлениями зачастую армируются соединителями на 50 и 75 Ом, но при этом необходимо учесть погрешность рассогласования (§ 6.3), которая при низких частотах не приводит к значительным отражениям.

Волновое сопротивление соединителя обеспечивается его присоединительными размерами, которые с целью унификации стандартизуются (ГОСТ 13317-80 и ГОСТ 20265-83). В пределах одного присоединительного размера обеспечиваетсястыковка соединителей разных исполнений. На чертежах присоединительных размеров, указанных в ГОСТ, помимо конструкции контактных узлов указывается способ соединения ответных частей. По способу соединения различают соединители: резьбовые, байонетные и врубные. Большинство коаксиальных соединителей имеет разнополярные контактные узлы, называемые вилкой и розеткой. Известны также конструкции унипольярных соединителей с одинаковыми контактными узлами. По точности изготовления контактных узлов, которая определяет значение коэффициента отражения, соединители делятся на измерительные (ГОСТ 13317-80) и общего применения (ГОСТ 20265-83).

Радиочастотные коаксиальные соединители, как и кабели, имеют большое разнообразие конструктивных исполнений. Соединитель, монтируемый на кабеле без дополнительного крепежа, называется кабельным. Если соединитель имеет дополнительные элементы для крепления на панелях и шасси приборов, он называется приборно-кабельным. Кабельные соединители могут быть прямыми и уголковыми. По методу монтажа кабеля соединители следует разделить на паяные, обжимные и опрессованные. Последние приобретают все большее распространение благодаря простоте заделки. Получили распространение также бесщтыревые соединители, т.е. такие, в которых роль штыря выполняет внутренний проводник кабеля [17]. В случаях, диктуемых условиями эксплуатации, применяют герметичные, теплостойкие и высоковольтные соединители.

Отдельно необходимо рассмотреть вопрос о критической частоте соединителя, т.е. частоте, начиная с которой происходит перерождение плоской Т-волны в волны высших порядков. Критическая частота коаксиального соединителя может быть определена по формуле (3.160). Коаксиальный канал соединителя содержит, как правило, два участка: с воздушной изоляцией и с изоляционно-крепежной шайбой. Как показывают расчеты, именно этот участок — с изоляционной шайбой и определяет критическую частоту соединителя, которая оказывается меньше критической частоты воздушного участка соединителя при-

Таблица 6.3. Критические частоты коаксиальных соединителей

Параметр	Тип соединителя по ГОСТ 13317-80									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
Верхняя граница рабочего диапазона частот по ГОСТ, ГГц	18	7,5	18	3	10	10	1	3	36	
Критическая частота изоляционного участка, ГГц	12,5	5	11	8	14	7,8	8,5	5,7	25	
Критическая частота воздушного участка, ГГц	19	8,3	19	—	—	13	—	9,3	38	
Зарубежные аналоги	APC-7 PC-7	7/16	N OSN		BNS OSB			SMA OSM RiM		

Таблица 6.4. Радиочастотные кабели и стыкующиеся с ними измерительные соединители

Присоединяемый кабель	Размеры, канал	Вилка		Розетка	
		Обозначение	Тип	Обозначение	Тип
PK 50-2-11		CP 50-272C ^{*3}	ВК	CP 50-274C ^{*3}	РК
PK 50-2-13				CP 50-270C ^{*3}	РПК
PK 50-4-11		CP 50-262C ^{*4}	ВК	CP 50-264C ^{*4}	РК
PK 50-4-13	III ^{* 1}			CP 50-265C ^{*4}	Р ПК
PK 50-4-11	7/3,04	CP 50-266C ^{*4}	ВК	CP 50-268C ^{*4}	РК
PK 50-4-13 с дополнительной оплеткой и трубкой					
PK 50-4-11	II ^{* 2}	CP50-254C	ВК	CP50-258C	РПК
PK 50-4-13	16/6,95	CP 50-256C	ВК		
PK 75-4-11	VIII ^{*2}	CP 75-255C	ВК	CP 75-257C	РПК
PK 75-4-15	16/4,60			CP 75-259C	РПК

П р и м е ч а н и е. ВК – вилка кабельная прямая; РК – розетка кабельная; РПК – розетка приборно-кабельная.

*1 Технические условия ЕЭО.364.029 ТУ.

*2 Технические условия ЕЭО.364.014 ТУ.

Верхняя рабочая частота соединителей канала 7/3,04 – 12 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению – при частотах до 7 ГГц: *3 – не более 1,25; *4 – не более 1,15; при частотах до 10 ГГц: *3 – не более 1,4; *4 – не более 1,3.

мерно в $\sqrt{\epsilon}$ раз. К сожалению, в ГОСТ на присоединительные размеры измерительных соединителей этот момент не учтен и приводятся завышенные значения верхней рабочей частоты. Критические частоты соединителей с учетом влияния изоляционных шайб приводятся в табл. 6.3. Очень близкие значения критических частот для соединителей аналогичных конструкций даются в каталоге фирмы "Amphenol".

Конструкции соединителей. При разработке, исследованиях и измерениях радиочастотных кабелей преимущественно используются измерительные соединители (табл. 6.4). В эксплуатационной аппаратуре используются соединители общего применения, и с целью унификации следует применять соединители с такой же конструкцией стыкующихся элементов, что и у измерительных (табл. 6.5 и 6.6). В последнее время преимущественное распространение получили следующие типы соединителей (см. табл. 6.3): II, III, V, VIII, IX. Аналогичные им соединители общего

Таблица 6.5. Радиочастотные кабели и соединители общего применения к ним по черт. 22 ГОСТ 20265-83

Присоединяемый кабель	Вилка		Розетка	
	Обозначение	Тип	Обозначение	Тип
PK 50-2-11	CP 50-424Ф	ВК	CP 50-425Ф	РПК
PK 50-2-13	CP 50-434Ф	ВКУ		
PK 50-2-21				
PK 50-3-11	CP 50-426Ф CP 50-435Ф	ВК ВКУ	CP 50-427Ф	РПК
PK 50-3-21	CP 50-428Ф CP 50-436Ф	ВК ВКУ	CP 50-429Ф	РПК
PK 50-4-11	CP 50-430Ф	ВК	CP 50-431Ф	РПК
PK 50-4-13	CP 50-437Ф	ВКУ		
PK 50-4-21	CP 50-432Ф CP 50-438Ф	ВК ВКУ	CP 50-433Ф	РПК
PK 50-7-11	CP 50-449Ф	ВК	CP 50-448Ф	РПК
PK 50-7-15	CP 50-450Ф	ВКУ	CP 50-453Ф	РК
PK 50-7-21	CP 50-447Ф	ВК	CP 50-446Ф	РПК
PK 50-7-22	CP 50-451Ф	ВКУ	CP 50-452Ф	РК
PK 50-7-58	CP 50-470 Ф*	ВК	CP 50-469 Ф*	РПК
PK 50-7-58C	CP 50-471 Ф*	ВКУ		

П р и м е ч а н и е. ВК – вилка кабельная прямая; ВКУ – вилка кабельная угловая; РПК – розетка приборно-кабельная; РК – розетка кабельная. Технические условия – ВРО.364.039 ТУ. Верхняя рабочая частота соединителей 10 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению: при частотах до 3 ГГц – не более 1,15; при частотах 3–10 ГГц – не более 1,3. Коаксиальный тракт 7/3 мм.

* Верхняя рабочая частота – 5 ГГц, КСВН не более 1,2.

Таблица 6.6. Миниатюрные радиочастотные кабели и соединители общего применения к ним

Присоединяе- мый кабель	Но- мер черт- ежа по ГОСТ	Вилка		Розетка		Верх- няя ра- бочая частота, ГГц
		Обозначение	Тип	Обозначение	Тип	
PK 50-2-11		CP 50-724 Ф	ВК	CP 50-723 Ф	РПК	
PK 50-2-13	23					10*
PK 50-2-21		CP 50-722 Ф	ВК	CP 50-721 Ф	РПК	
PK 50-2-25		CP 50-726 Ф	ВК	CP 50-725 Ф	РПК	
PK 50-1-23		CP 50-336 Ф	ВПК	CP 50-337 Ф	РК	
PK 50-1,5-22	15	CP 50-338 Ф	ВПК	CP 50-339 Ф	РК	5**
PK 50-2-25		CP 50-340 Ф	ВПК	CP 50-341 Ф	РК	
PK 50-1-11		CP 50-369 Ф	ВПК	CP 50-368 Ф	РК	
PK 50-1-12	15					5**
PK 50-1,5-11		CP 50-371 Ф	ВПК	CP 50-370 Ф	РК	
PK 50-1,5-12						
PK 75-1-11		CP 75-323 Ф	ВПК	CP 75-324 Ф	РК	
PK 75-1-12	16					5**
PK 75-1,5-11		CP 75-325 Ф	ВПК	CP 75-326 Ф	РК	
PK 75-1,5-12						
PK 50-2-11	7	CP 50-74Ф, П	ВК	CP 50-1Ф, П	РПК	
PK 50-2-13		CP 50-81Ф, П	ВКУ			3***
PK 50-3-11		CP 50-76Ф, П	ВК	CP 50-2Ф, П	РПК	
		CP 50-80Ф, П	ВКУ			

*Коэффициент стоячей волны по напряжению не более: 1,2 до 4 ГГц и 1,3 до 10 ГГц.

**То же 1,2.

***То же 1,25.

П р и м е ч а н и е. ВПК – вилка приборно-кабельная.

применения должны соответствовать чертежам: 5, 22, 7, 6, 23. На рис. 6.17 показан внешний вид этих кабельных соединителей (исполнения – вилка), смонтированных на радиочастотных кабелях.

В конструкции соединителя можно выделить три основных группы деталей: контактно-коаксиальная группа, группа механического соединения и группа крепления на кабеле. Механическое соединение обеспечивается с помощью резьбовых и замковых (байонетных) устройств или за счет трения (врубные соединители). Конструкции контактно-коаксиальной группы показаны в уже упоминавшихся ГОСТ, и нет смысла их повторять. С целью уменьшения контактных сопротивлений и по-

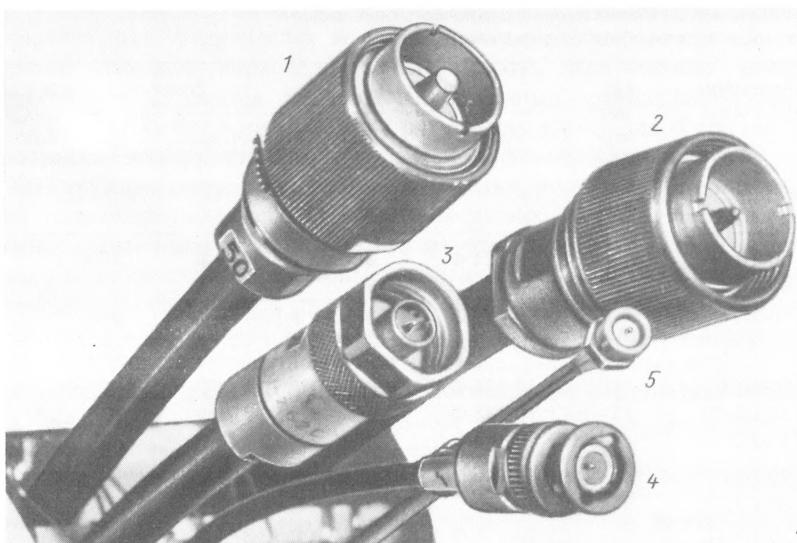


Рис. 6.17. Внешний вид радиочастотных соединителей по чертежам из ГОСТ 20265-83:

1 – 5; 2 – 6; 3 – 22; 4 – 7; 5 – 23

вышения надежности соединения контактные узлы покрывают серебром или его сплавами, а в особо ответственных случаях — золотом. Наиболее часто прибегают к золочению штырей.

Неоднородность кабельного тракта, надежность работы и стабильность параметров в значительной степени определяются качеством монтажа соединителя на кабеле и конструкцией самого узла крепления. Соединители, в которых оба проводника кабеля припаиваются (рис. 6.18), обеспечивают устойчивый контакт и надежно работают в основном со среднегабаритными кабелями. При пайке очень важно соблюдать требования инструкций по монтажу и эксплуатации, использовать приспособления для отвода тепла от изоляции. Монтаж соединителей на гибкие кабели с помощью пайки — достаточно трудоемкая операция, и здесь очень помогают приспособления, подобные тем, что предлагают фирмы "Radiall", "Suhner".

Монтаж паяемых соединителей на миниатюрные кабели намного усложняется по сравнению со среднегабаритными. Чтобы обойти эту трудность и снизить трудоемкость монтажа, стоимость которого обычно пре-восходит стоимость кабеля, предпочитают применять кабели с фторопластовой изоляцией. Другим выходом является применение обжимных и опрессовываемых соединителей. В обжимных соединителях припаивают только внутренний проводник, а контакт с внешним обеспечивают

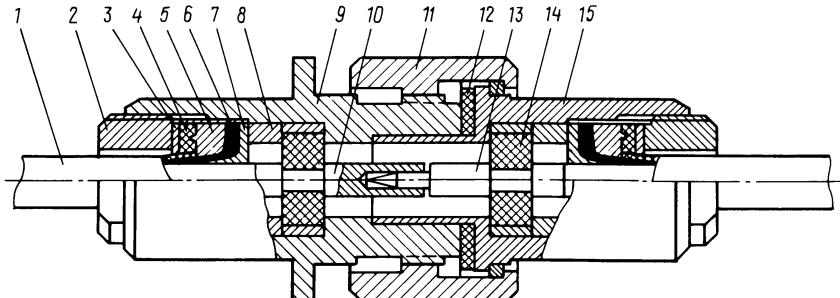


Рис. 6.18. Радиочастотный кабель РК 50-3-21 состыкован посредством монтируемых пайкой соединителей СР 50-429Ф (слева) и СР 50-428Ф:

1 – кабель; 2 – втулка; 3 – шайба; 4 – уплотнительное кольцо; 5 – втулка крепления оплетки; 6 – место пайки оплетки; 7 – конусная втулка; 8 – кольцо; 9 – корпус розетки; 10 – цанг; 11 – гайка; 12 – уплотнительное кольцо; 13 – штырь; 14 – изолятор; 15 – корпус вилки

конусными, цанговыми или винтовыми обжимными элементами. Обжимные соединители, благодаря тому что легко разбираются, находят применение при измерениях радиочастотных кабелей.

Самого пристального внимания заслуживают соединители, монтируемые на кабелях с помощью холодной опрессовки. Трудоемкость монтажа путем опрессовки уменьшается в три-четыре раза, упрощается конструкция соединителя, в котором всего остаются: один узел корпуса и две детали – штырь и опрессовочная втулка. Единственный недостаток этих соединителей – они неразборные. Соединители всех массовых присоединительных размеров имеют модификации, предназначенные для монтажа опрессовкой. Особенно показательны в этом смысле каталоги фирм "Radiall" и "Omni Spectra". В СССР опрессованные соединители марок СР 50-664Ф, СР 50-654Ф, СР 50-655Ф применяются для монтажа на субминиатюрные кабели РК 50-06-23, РК 50-1-24 и их аналоги.

Бесштыревые соединители. Как уже отмечалось выше, миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры и освоение все более высоких частот расширили применение полужестких радиочастотных кабелей. Большим их достоинством является то, что они позволяют применять так называемые бесштыревые соединители, не имеющие таких элементов, как штырь и изолятор. Роль штыря и изолятора выполняет сам радиочастотный кабель. Бесштыревые соединители характеризуются малым коэффициентом отражения, небольшими габаритами, низкой стоимостью и простотой монтажа. Обычно бесштыревой соединитель представляет собой единый узел в сборке, который после разделки кабеля монтируется путем пайки на внешний проводник кабеля в виде медной трубки. Наглядно преимущества бесштыревого соединителя демонстрирует рис. 6.19, где для сравнения показаны и штыревые соединители.

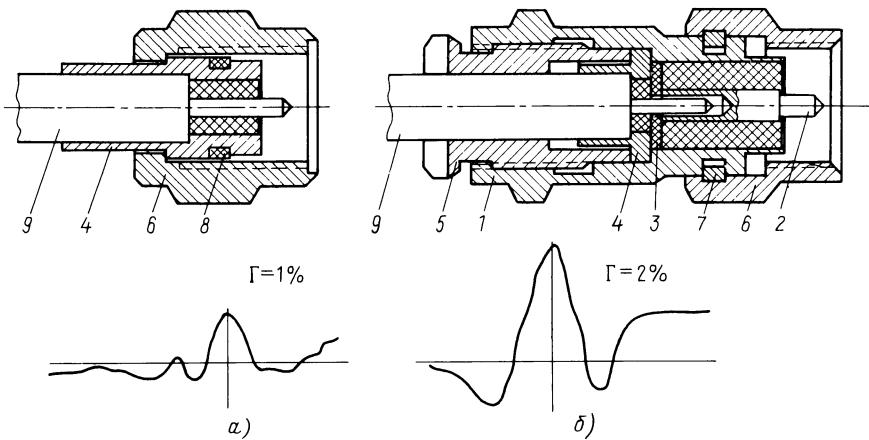


Рис. 6.19. Сравнение конструкций бесштыревого и штыревого соединителей канала 3,5/1,52:

a – бесштыревой; *б* – измерительный (со штырем); 1 – корпус; 2 – штырь; 3 – изолятор; 4 – паяемая втулка; 5 – поджимная втулка; 6 – гайка; 7 – стопорное кольцо; 8 – уплотнение; 9 – кабель

Благодаря простоте конструкции трудоемкость изготовления бесштыревых соединителей в пять–шесть раз ниже, чем обычных соединителей; во столько же раз ниже трудоемкость их монтажа на кабелях. Но применение бесштыревых соединителей накладывает более строгие требования на конструкцию кабеля. Диаметр внутреннего проводника кабеля должен быть равен диаметру штыря соединителя и выполняться из материалов, устойчивых к механическим воздействиям, возникающим пристыковке и расстыковке. В СССР разработан кабель марки РК 50-3-28-Пр, который может армироваться бесштыревым соединителем (рис. 6.20) с присоединительными размерами IX канала [17]. Бесштыревые соединители и инструмент для их монтажа выпускаются всеми передовыми зарубежными фирмами. За рубежом наибольшее распространение получили бесштыревые соединители типа SMA, монтируемые на полужесткий кабель типа RG402/U.

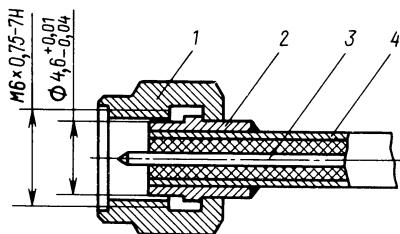


Рис. 6.20. Бесштыревой коаксиальный соединитель:

1, 2 – гайка и втулка соединителя; *3, 4* – внутренний и внешний проводники кабеля

На базе полужестких кабелей и бесштыревых соединителей как фирмами радиоэлектронных компонентов, так и фирмами, изготавлиющими кабельные изделия, производится выпуск комплектных изделий "Cable assemblies". Дословно этот термин можно перевести как "кабельная сборка". Предлагается в отечественной литературе использовать термин "лопер", который представляет собой аббревиатуру, образованную из словосочетания: линейный отрезок передачи радиочастотный.

Изделия измерительной техники. На базе полужестких лоперов может быть создана гамма устройств для радиотехнических измерений. В настоящее время получили распространение линии задержки, но, кроме того, могут быть созданы широкополосные меры затухания для частотных измерений и меры волнового сопротивления для импульсных измерений. Примеры применения таких устройств упомянуты в § 6.5. Меры волнового сопротивления обладают точностью, не уступающей жестким линиям, и в то же время значительно выигрывают по трудоемкости. Лоперы могут быть изготовлены длинами от нескольких сантиметров до нескольких метров. Кабельные меры затухания хотя и имеют частотную зависимость потерь, отличаются высокой стабильностью параметров и небольшими коэффициентами отражения в 2–3 раза более широкой полосе, чем фиксированные жесткие аттенюаторы.

ГЛАВА 7

КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

7.1. КОАКСИАЛЬНЫЕ РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

Электрические, механические и эксплуатационные параметры кабелей существенно зависят от конструкции проводников и изоляции. Для выявления логических связей и подобия в конструктивных схемах и параметрах кабелей и в соответствии с подходами, изложенными в гл. 1 (табл. 1.1), мы разделили коаксиальные радиочастотные кабели на следующие укрупненные группы:

- 1) кабели гибкой конструкции со всеми видами сплошной изоляции и внешним проводником в виде оплетки проволоками, сюда же включены кабели с усиленным экранированием, имеющие две или три оплетки, и триаксиальные;
- 2) кабели гибкой конструкции со всеми видами полувоздушной изоляции и внешним проводником в виде оплетки проволоками, в том числе с усиленным экранированием;
- 3) кабели полужесткой классической конструкции со сплошной изоляцией и трубчатым гладким внешним проводником;
- 4) кабели полужесткой конструкции со всеми видами изоляции и гофрированным сварным внешним проводником;

5) кабели гибкой конструкции со всеми видами изоляции и внешним проводником в виде повива плоских проволок;

6) кабели полугибкой конструкции со всеми видами изоляции и внешним проводником из продольно наложенных металлических фольг или лент или металлопластмассовых лент.

Сведения о кабелях даются в виде краткой справки об особенностях данной укрупненной группы и таблиц двух видов: с конструктивными и рядом эксплуатационных и с электрическими параметрами. Информация в таблицах представлена по следующим правилам.

Марка кабеля приводится по действующим техническим условиям. Если в марке присутствует буква С, то соответствующий кабель нормируется по температурному коэффициенту фазы, температурному коэффициенту емкости или частотной зависимости входного коэффициента отражения, выражаемого обычно через КСВН. Буквы Пр означают, что кабель имеет прецизионное исполнение элементов, ужесточенный допуск на волновое сопротивление и нормируются по местному коэффициенту отражения по длине кабеля. Буквы АУ означают, что основное назначение кабеля – использование в антенных удлинителях.

Конструктивная схема – в этой графе приводится условное обозначение конструктивной схемы кабеля согласно правилам, изложенным в первой главе. По этому шифру легко обнаружить кабели, аналогичные по конструктивной схеме.

Конструкция и материал внутреннего проводника. В этом столбце приводятся данные по числу, диаметру и материалу проволок внутреннего проводника. Условные обозначения применяемых проводниковых материалов приведены ниже.

Конструкция и материал изоляции. Сначала указываются диаметр по изоляции и предельные допустимые отклонения. Если изоляция выполнена из одного материала, то приводится только условное обозначение материала. Если изоляция выполнена из нескольких слоев, то приводится условное обозначение конкретного исполнения.

Конструкция и материал внешнего проводника. В столбце указываются диаметр и материал проволок оплетки, а также допустимые значения поверхностной плотности оплетки в процентах. Конструкция каждой оплетки показывается отдельной строкой. В случае полужестких и полугибких кабелей вместо диаметра проволок указывается толщина внешнего проводника, а вместо плотности глубина и шаг гофрирования.

Наружный диаметр. Материал оболочки (покрытия). В данном столбце указывается наружный диаметр (в миллиметрах) кабеля с допусками независимо от того, есть у кабеля оболочка или нет. В случае монолитной оболочки указывается ее материал, а если оболочка (защитное покрытие) состоит из нескольких слоев, то приводится условное обозначение конкретного исполнения, как для изоляции. Если кабель не имеет оболочки, то это показывается прочерком.

Значение столбца *Масса, кг/км*, ясно из наименования. В столбце $R_{изгmin}$, мм приводятся значения минимально допустимого по техническим условиям радиуса изгиба. По такому радиусу кабель может быть изогнут при температуре не ниже +5°С. Предварительно изогнутый при положительных температурах по минимальному радиусу кабель затем может эксплуатироваться во всем диапазоне рабочих температур. Если в строке помимо цифры есть буква П, то для данного кабеля допускается определенное техническими условиями число перегибов, если буква Б – перемоток.

Рабочие температуры. Здесь приводятся минимальная и максимальная допустимые температуры (в градусах Цельсия) при эксплуатации кабеля. Отмечается также допустимость второго диапазона смены температур у ряда теплостойких кабелей.

В столбцах *Волновое сопротивление, Ом;* *C, пФ/м;* ξ ; *Uисп, кВ;* $U_{кор}$, кВ приводятся значения номинального волнового сопротивления с допусками, электрической емкости, коэффициента укорочения длины волны, испытательное напряжение частоты 50 Гц для изоляции и напряжение начала внутренних разрядов в изоляции (напряжение "начала короны"). Если норм по напряжениям нет, то делается прочерк. В случае отсутствия норм по волновому сопротивлению, *C* и ξ приводятся расчетные значения.

Учитывая, что предельно допустимые значения коэффициента затухания и мощности на входе, приводимые в технических условиях, не всегда раскрывают реальные возможности кабеля, в справочных таблицах приведены расчетные значения, определенные по уточненной методике, предложенной МЭК. Данные по *Номинальному коэффициенту затухания, дБ/м, и Номинальной мощности на входе, Вт, при 40°С* приводятся в виде дроби для четырех наиболее характерных частот: 0,2; 1; 3 и 10 ГГц. Значения для частот 3 и 10 ГГц указываются только в том случае, если в технических условиях есть соответствующие нормы.

Значения сопротивления внутреннего проводника – R_1 , *Ом/км* являются также расчетными.

Гибкие коаксиальные радиочастотные кабели со сплошной изоляцией – это наиболее обширная группа радиочастотных кабелей. Внешний вид коаксиального гибкого кабеля показан на рис. 7.1. Внутренний проводник выполняется как однопроволочным, так и скрученным практически из всех типов проводниковых материалов. С целью повышения механической прочности используются бронзовые и сталемедные проволоки, в том числе с защитными покрытиями.

Изоляция выполняется преимущественно из полиэтилена низкой плотности, а у теплостойких кабелей – из нескольких разновидностей фторопластов. Среднегабаритные кабели преимущественно изолируются пленочным фторопластом-4 путем обмотки; в миниатюрных получили распространение монолитный фторопласт-4Д и шприцуемый фторопласт-4МБ.

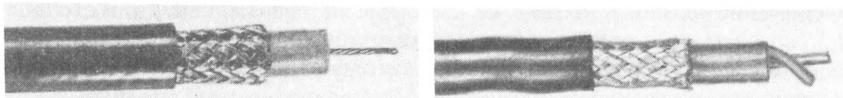


Рис. 7.1. Коаксиальный гибкий кабель РК 75-7-16 со сплошной изоляцией и внешним проводником в виде оплетки

Рис. 7.2. Коаксиальный гибкий кабель РК 75-9-31 с полувоздушной (кордельно-трубчатой) изоляцией и внешним проводником в виде оплетки

Внешние проводники кабелей выполняются в виде симметричной оплетки медными проволоками, а также с покрытиями серебром или оловом. Кабели с усиленным экранированием имеют две, а в отдельных случаях три оплетки.

Для оболочек радиочастотных кабелей наиболее широко применяются светостабилизированный полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат и фторопласт-4МБ. Ряд теплостойких кабелей имеет защитные покровы в виде обмотки лентами фторопласта-4 и оплетки стеклонитями, пропитанной кремнийорганическим лаком.

Конструктивные характеристики гибких радиочастотных кабелей со сплошной изоляцией приведены в табл. 7.1, а электрические параметры – в табл. 7.2.

Гибкие радиочастотные коаксиальные кабели с полувоздушной изоляцией – это достаточно развитая группа. Внешний вид кабеля с полувоздушной изоляцией показан на рис. 7.2. Наиболее распространение получила кордельно-трубчатая и трубчатая изоляция. У кабелей нормальной теплостойкости кордель и трубка выполняются из монолитного полиэтилена, у кабелей повышенной теплостойкости кордель обычно выполняется из фторопласта-4Д, а трубка – в виде обмотки лентами фторопласта-4. В миниатюрных кабелях с волновым сопротивлением 100 и 150 Ом широко используется трубчатая изоляция из полиэтилена или фторопласта-4МБ. Такая изоляция внутренний проводник не фиксирует. Здесь нашла применение своеобразная конструкция внутреннего проводника – гофрированная медная твердая (ЗИГМ) или сталемедная луженая (ЗСМО) проволока, что увеличивает устойчивость проводника относительно изоляции и, следовательно, стабильность параметров. Конструкция внешних проводников и оболочек кабелей с полувоздушной изоляцией тех же типов, что у кабелей со сплошной изоляцией, но значительно чаще используется конструкция без оболочек для обеспечения повышенной гибкости.

В миниатюрных кабелях полувоздушная изоляция применяется для увеличения скорости распространения сигналов и для повышения гибкости; в среднегабаритных кабелях полувоздушная изоляция обеспечивает уменьшение коэффициента затухания. В кабелях этой группы

Таблица 7.1. Конструктивные параметры коаксиальных гибких радиочастотных кабелей со сплошной изоляцией

Марка кабеля	Конструкция и материал внутреннего проводника	Конструкция и материал изоляции	Конструкция и материал внешнего проводника	Наружный диаметр, мм, и материал оболочки	Масса, кг/км	$R_{изг\min}$	Рабочие температуры, °С
PK 50-0,6-11	K121	7x0,7 БРС	0,60±0,05 ПЭ	0,06 МС 65–80	1,4±0,1 СПЭ	2,4	-60÷+85
PK 50-0,6-21	K210	7x0,08 МС	0,60±0,05 Ф4	0,06 МС ≥70	≤1,0 –	2,0	-60÷+200**
PK 50-0,6-22	K211	7x0,08 МС	0,60±0,05 Ф4	0,06 МС ≥70	1,2±0,1 Ф4МБ	3,5	-60÷+200**
PK 50-0,6-23	K217	7x0,08 БРС	0,60±0,05 Ф4МБ	0,06 МС 65–75	1,2±0,1 Ф4МБ	3,27	-60÷+200**
PK 50-0,6-24	K220	7x0,08 БРС	0,60±0,05 Ф4МБ	0,06 МОН 65–75	1,2±0,1 Ф4МБ	3,27	-60÷+155
PK 50-1-11	K108	1x0,32 СМС	1,0±0,07 ПЭ	0,08 МС 85–92	1,9±0,2 СПЭ	5,7	-60÷+85
PK 50-1-12	K109	1x0,32 СМО	1,0±0,07 ПЭ	0,08 МО 85–92	1,9±0,2 СПЭ	5,8	-60÷+85
PK 50-1-13	K121	7x0,11 БРС	1,0±0,1 ПЭ	0,08 МС 75–85	1,9±0,2 СПЭ	5,4	-60÷+85
PK 50-1-21	K202	1x0,34 СМС	1,0±0,1 Ф4	0,08 МС 85–92	1,9±0,2 Ф4МБ	8,7	-60÷+200
PK 50-1-22*	K210	7x0,12 МС	1,0±0,1 Ф4	0,06 МС 85–92	≤1,3 –	5,0	-60÷+200
PK 50-1-22	K211	7x0,12 МС	1,0±0,1 Ф4	0,06 МС 85–92	1,7±0,15 Ф4МБ	7,0	-60÷+200
PK 50-1-24	K217	7x0,12 БРС	1,0±0,05 Ф4МБ	0,06 МС 75–85	1,7+0,15 Ф4МБ	6,85	-60÷+200**
PK 50-1-25, С	K209	7x0,12 МС	1,0±0,1 Ф4Д	0,06 МС 85–92	1,7±0,15 Ф4МБ	8,0	-60÷+200**
PK 50-1-26	K220	7x0,12 БРС	1,0±0,05 Ф4МБ	0,06 МОН 80–90	1,7+0,15 Ф4МБ	6,7	-60÷+155
PK 75-1-11	K108	1x0,17 СМС	1,0+0,10 –0,04 ПЭ	0,08 МС 85–92	1,9±0,2 СПЭ	5,0	-60÷+85
PK 75-1-12	K109	1x0,17 СМО	1,0+0,10 –0,04 ПЭ	0,08 МО 85–92	1,9±0,2 СПЭ	5,0	-60÷+85
PK 75-1-13	K121	7x0,06 БРС	1,0±0,1 ПЭ	0,08 МС 75–85	1,9±0,2 СПЭ	5,1	-60÷+85
PK 75-1-21	K202	1x0,19 СМС	1,0+0,10 –0,15 Ф4	0,08 МС 85–92	1,9±0,2 Ф4МБ	8,3	-60÷+200
PK 75-1-22	K216	7x0,07 БРС	1,0±0,07 Ф4Д	0,06 МС 85	1,7+0,15 –0,10 Ф4МБ	6,8	-60÷+200**
PK 75-1-23	K218	7x0,07 БРС	1,1±0,07 Ф4Д	0,06 МС 85	≤1,5 –	4,8	-60÷+155
PK 75-1-24	K220	7x0,07 БРС	1,0±0,05 Ф4МБ	0,06 МОН 80–90	1,7+0,15 –0,10 Ф4МБ	6,4	-60÷+155

Продолжение табл. 7.1

222

Марка кабеля	Конструкция и материал внутреннего проводника	Конструкция и материал изолирующей оболочки	Конструкция и материал внешнего проводника	Наружный диаметр, мм, и материал оболочки	Масса, кг/км	$R_{нагл\min}$	Рабочие температуры, °С
PK 50-1, 5-11	K108	1x0,47 CMC 1,5±0,08 ПЭ	0,08 МС 85-92	2,4±0,2 СПЭ	9,4	10	-60÷+85
PK 50-1, 5-12	K109	1x0,47 CMO 1,5±0,08 ПЭ	0,08 МО 85-92	2,4±0,2 СПЭ	9,5	10	-60÷+85
PK 50-1, 5-21	K202	1x0,51 CMC 1,5+0,03 Ф4	0,08 МС 85-92	2,4±0,2 Ф4МБ	14,4	10	-60÷+200
PK 50-1, 5-23, С	K209	7x0,18 МС 1,5±0,1 Ф4Д	0,08 МС 85-92	2,4±0,25 Ф4МБ	15	5	-60÷+200**
PK 50-1, 5-26	K220	7x0,18 БРС 1,5±0,07 Ф4МБ	0,08 МОН 88-92	2,4±0,2 Ф4МБ	14,9	10,II	-60÷+155
PK 75-1, 5-11	K108	1x0,24 CMC 1,5±0,08 ПЭ	0,08 МС 85-92	2,4±0,2 СПЭ	8,4	10	-60÷+85
PK 75-1, 5-12	K109	1x0,24 CMO 1,5±0,08 ПЭ	0,08 МО 85-92	2,4±0,2 СПЭ	8,6	10	-60÷+85
PK 75-1, 5-21	K202	1x0,28 CMC 1,5+0,03 Ф4	0,08 МС 85-92	2,4±0,2 Ф4МБ	13,5	10	-60÷+200
PK 75-1, 5-22	K216	7x0,10 БРС 1,6±0,07 Ф4Д	0,08 МС 85-92	2,4+0,2 Ф4МБ	13,5	10	-60÷+200**
PK 75-1, 5-23	K220	7x0,10 БРС 1,5±0,07 Ф4МБ	0,08 МОН 88-92	2,4±0,25 Ф4МБ	13,5	10,II	-60÷+155
PK 50-2-11	K100	1x0,67 М 2,2±0,1 ПЭ	0,10 М 88-92	3,7±0,2 СПЭ	19,4	20	-60÷+85
PK 50-2-12	K119	7x0,24 МС 2,2±0,1 ПЭ	0,10 МС 85-92	3,2+0,2 СПЭ	16,4	15	-60÷+85
PK 50-2-13	K101	1x0,67 М 2,2±0,1 ПЭ	0,10 М 88-92	3,7±0,2 ГВХ	21,2	20	-40÷+70
PK 50-2-15	K126	1x0,67 М 2,2±0,1 ПЭ	0,10 М 88-92	0,10 М 88-92			
PK 50-2-16	K120	7x0,24 МО 2,2±0,1 ПЭ	0,10 МО 85-92	3,7±0,2 СПЭ	26,8	22	-60÷+85
PK 50-2-21	K204	1x0,73 МС 2,2±0,1 Ф4	0,10 МС 88-92	3,2+0,2 СПЭ	16,6	15	-60÷+85
PK 50-2-22	K211	7x0,26 МС 2,2+0,05 Ф4	0,10 МС 85-92	3,2±0,25 ОФОС	24,9	20	-60÷+200
PK 50-2-23	K226	1x0,73 МС 2,2±0,1 Ф4Д	0,10 МС 88-92	3,2±0,25 Ф4МБ	25,1	15	-60÷+200
PK 50-2-24	K214	7x0,25 МС 2,2+0,5 Ф4	0,12 МС 88-92	3,7±0,25 ОФОС	37,5	40	-60÷+200
				3,2±0,3 Ф4	24,7	20	-60÷+200**

PK 50-2-26	K223	19x0,15 MC 2,2 ^{+0,05} _{-0,15} ТОФ	0,10 MC 90-94	4,0±0,4 ОФКР	31,2	20	-60÷+200	
PK 50-2-27, С	K209	7x0,25 MC 2,2±0,1 Ф4Д	0,12 MC 85-92	3,2±0,3 Ф4МБ	27	7	-60÷+200	
PK 75-2-11	K103	1x0,37 М 2,2±0,1 ПЭ	0,10 МО 88-92	3,7 ^{+0,2} _{-0,1} СПЭ	15,2	20	-60÷+85	
PK 75-2-12	K119	7x0,12 MC 2,2±0,1 ПЭ	0,10 MC 85-92	3,2 ^{+0,2} _{-0,1} СПЭ	14,5	15	-60÷+85	
PK 75-2-13	K120	7x0,12 MO 2,2±0,1 ПЭ	0,10 MO 85-92	3,2 ^{+0,2} _{-0,1} СПЭ	14,7	15	-60÷+85	
PK 75-2-21	K204	1x0,41 MC 2,2±0,1 Ф4	0,10 MC 88-92	3,2±0,25 ОФОС	22,9	20	-60÷+200	
PK 75-2-22	K211	7x0,15 MC 2,2 ^{+0,1} _{-0,6} Ф4	0,10 MC 85-92	3,2±0,25 Ф4МБ	23,5	15	-60÷+200	
РКТР	K236	7x0,30 MC 2,2±0,15 Ф4	0,12-0,15 MC ≥90≤4,5 ОФКР	33,9	-	-60÷+200		
РКТФ-71	K214	7x0,15 MC 1,8±0,2 Ф4	0,12 MC 60-70	2,5 ^{+0,2} _{-0,4} Ф4	13,3	12,5, П	-183÷+200	
РКТФ-71М	K246	7x0,15 MC 1,8±0,2 Ф4Д	0,12 MC 60-70	2,5 ^{+0,2} _{-0,4} Ф4	13,3	12,5, П	-183÷+200	
РКЭФС-19	K247	1x0,68 MC 2,2±0,25 Ф4ОИ	0,15 MC ≥95	≤4,6 Ф4ОИ	32,5	13,5	-60÷+155	
РКЭФС-63	K248	7x0,23 MC 2,2±0,25 Ф4ОИ	0,15 MC ≥95	≤4,6 Ф4ОИ	32,0	13,5	-60÷+155	
PK 50-3-11	K128	1x0,9 М 2,95±0,1 ПЭ	0,12 МО 88-92	0,12 МО 88-92	5,0±0,2 СПЭ	46,7	30	-60÷+85
PK 50-3-13	K104	1x0,9 М 2,95±0,1 ПЭ	0,12 МО 88-92	4,4±0,2 ПВХ	34,4	30	-40÷+70	
PK 50-3-21	K204	1x1,01 MC 2,95±0,1 Ф4	0,12 МС 88-92	4,4±0,2 ОФОС	48	30	-60÷+200	
PK 50-3-23	K211	7x0,35 MC 2,95±0,15 Ф4	0,12 МС 88-92	4,4±0,25 Ф4МБ	46	30	-60÷+200**	
PK 50-3-26	K249	7x0,35 MC 2,95±0,15 ДОФ	0,12 MC 85-90	0,12 M 88-92	5,9±0,5 ОФКР	68	40	-60÷+200
PK 50-3-27	K250	7x0,35 MC 2,95±0,15 ДОФ	0,12 MC 85-90	0,12 M 88-92	4,4±0,3 ОФОС	53	30	-60÷+200
PK 75-3-15	K132	7x0,17 М 3,05±0,1 ПЭ	0,12 M 88-92	0,12 M 88-92	5,0±0,2 ПВХ	53,4	30	-40÷+70
PK 75-3-16	K116	7x0,16 М 2,90±0,1 ПЭ	0,12 M 88-92	4,4 ^{±0,25} ПВХ	28	30, П	-40÷+70	
PK 75-3-21	K204	1x0,56 MC 2,95±0,1 Ф4	0,12 MC 88-92	4,4 ^{±0,2} ОФОС	45	30	-60÷+200	
PK 75-3-22	K211	7x0,19 MC 2,95±0,1 Ф4	0,12 MC 88-92	4,3 ^{±0,2} Ф4МБ	41,1	30, П	-60÷+200**	
PK 75-3-23	K210	7x0,19 MC 2,95±0,1 Ф4	0,12 MC 88-92	3,43	-	30	-60÷+155	
РКУ-63	K120	7x0,30 MO 3,0±0,2 ПЭВП	0,12 MO ≥96	4,5 ^{±0,4} СПЭ	32,3	30	-60÷+100	
РК-74	K116	7x0,23 М 3,2±0,2 ПЭ	0,12-0,15M 88-965,2 ПВХ	40	30	-40÷+60		

Продолжение табл. 7.1

Марка кабеля	Конст- рукция и мате- риал внут- реннего схемы	Конструкция и материал изоли- ции	Конструкция и материал внеш- него проводника	Наружный ди- метр, мм, и ма- териал оболочки	Масса, кг/км	Гибкость материа- л ратуры, °С
PK 50-4-11	K126	1×1,37 М	4,6±0,12 ПЭ	0,15 М 88–92	9,6±0,6 СПЭ	107,2
PK 50-4-11-C	K126	1×1,37 М	4,6±0,05 ПЭ	0,15 М 88–92	7,8±0,25 СПЭ	99,2
PK 50-4-13	K127	1×1,37 М	4,6±0,12 ПЭ	0,15 М 88–92	9,6±0,6 ПВХ	141
PK 50-4-14	K251	7×0,52 М	4,6±0,2 ДФО	0,15 М 88–92	11,2 ^{+1,1} _{-0,5} ПРУ	173
PK 50-4-14-ОП	K252	7×0,52 М	4,6±0,2 ДФО	0,15 М 88–92	12,4 ^{+1,4} _{-0,6} ПРУС	276
PK 50-4-15	K253	7×0,52 М	4,6±0,2 ДФО	0,15 М 88–92	7,8 ^{+0,8} _{-0,4} ОФР	107
PK 50-4-21	K225	1×1,50 МС	4,6±0,12 Ф4	0,12 МС 88–92	6,5±0,4 ОФОС	110
PK 75-4-11	K100	1×0,72 М	4,6±0,12 ПЭ	0,15 М 88–92	7,0±0,25 СПЭ	59,4
PK 75-4-11-C	K100	1×0,72 М	4,6±0,05 ПЭ	0,15 М 88–92	7,0±0,2 СПЭ	60,1
PK 75-4-12	K115	7×0,26 М	4,6±0,12 ПЭ	0,15 М 88–92	7,0±0,25 СПЭ	60,2
PK 75-4-12-C	K115	7×0,26 М	4,6±0,05 ПЭ	0,15 М 88–92	7,0±0,2 СПЭ	60,9
PK 75-4-13	K169	7×0,26 М	4,6±0,2 ПЭ	0,15 М 88–92	7,6 ^{+0,4} _{-0,6} ОАВ	74,6
PK 75-4-15	K101	1×0,72 М	4,6±0,12 ПЭ	0,15 М 88–92	7,0±0,25 ПВХ	65,9
PK 75-4-16	K116	7×0,26 М	4,6±0,12 ПЭ	0,15 М 88–92	7,0±0,25 ПВХ	65,6
PK 75-4-18	K167	1×0,72 М	4,6±0,2 ПЭ	0,15 МС 88–92	7,3±0,4 СПЭ	63,3
PK 75-4-110	K115	7×0,26 М	4,6±0,15 Э	0,15 М 88–92	7,0±0,25 СПЭ	59,5

PK 75-4-111	K168	7×0,26 M	4,6±0,15 ПЭ	0,15 М 85-92				-60÷+85
PK 75-4-112	K170	7×0,26 M	4,6±0,15 ПЭ	0,15 М 85-92	8,4±0,25 СПЭ	122	50	
			ПЭ ОБМ					
PK 75-4-21	K204	1×0,85 MC	4,6±0,12 Ф4	0,15 М 85-95	8,2±0,25 СПЭ	99	50	
PK 75-4-22	K213	7×0,30 MC	4,6±0,12 Ф4	0,12 МC 88-92	5,9±0,4 ОФОС	77	30	-60÷+200
PKЭФС-1	K247	1×0,68 MC	4,2±0,4 Ф4ОШ	0,15 МC ≥95	5,9±0,4 ОФОС	77	30	-60÷+200
PKΦ-1	K254	7×0,71 M	6,5 Ф4	0,12-0,15 М ≥96	≤7,7 Ф4ОШ	95	230	-60÷+155
PK 50-7-11	K115	7×0,76 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	8,5±0,6 ОФОС	165	42	-60÷+320
PK 50-7-11-C	K115	7×0,76 M	7,25±0,1 ПЭ	0,15 М 88-92	10,0±0,3 СПЭ	133	50	-60÷+85
PK 50-7-12	K131	7×0,76 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	10,0±0,3 СПЭ	130	50	-60÷+85
PK 50-7-15	K116	7×0,76 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	11,2±0,7 СПЭ	173	50	-60÷+85
PK 50-7-16	K132	7×0,76 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	10,3±0,3 ПВХ	140	50	-40÷+70
PK 50-7-21	K254	7×0,83 M	7,25±0,20 Ф4	0,15 М 88-92	11,2±0,7 ПВХ	186	50	-40÷+70
PK 50-7-22	K213	7×0,83 MC	7,25±0,15 Ф4	0,15 МC 88-92	8,9±0,5 ОФОС	206	50	-60÷+200
PK 50-7-28	K236	7×0,83 MC	7,25±0,25 Ф4	0,15 МC 88-92	9,0±0,5 ОФОС	176	50	-60÷+200
PK 75-7-11'	K100	1×1,13 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	11,9±0,5 ОФКР	226	50	-60÷+200
PK 75-7-12	K115	7×0,4 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	9,5±0,3 СПЭ	104	50	-60÷+85
PK 75-7-15	K101	1×1,13 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	10,0±0,3 СПЭ	113	50	-60÷+85
PK 75-7-16	K116	7×0,4 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	9,5±0,3 ПВХ	113	50	-40÷+70
PK 75-7-21	K204	1×1,3 M	7,25±0,15 Ф4	0,15 МC 88-92	10,0±0,3 ПВХ	129	50	-40÷+70
PK 75-7-22	K213	7×0,46 MC	7,25±0,15 Ф4	0,15 МC 88-92	8,6±0,6 ОФОС	160	50	-60÷+200
PK 100-7-11	K100	1×0,60 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	8,6±0,6 ОФОС	159	50	-60÷+200
PK 100-7-13	K101	1×0,60 M	7,25±0,15 ПЭ	0,15 М 88-92	9,7±0,3 СПЭ	102	50	-60÷+85
PK 100-7-21	K204	1×0,74 MC	7,25±0,15 Ф4	0,15 МC 88-92	9,7±0,3 ПВХ	112	50	-40÷+70
					8,6±0,5 ОФОС	154	50	-60÷+200

Продолжение табл. 7.1

226

Марка кабеля	Конст-рукти-вная схема	Конструкция и материал изоли-рующей внутреннего проводника	Конструкция и материал внеш-него проводника	Наружный ди-метр, мм, и ма-териал оболочки	Масса, кг/км	$R_{нагр}$, м \cdot мин	Рабочее темпе-ратуры, °С
PK 50-9-11	K115	7x0,95 М	9,0±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	12,2±0,4 СПЭ	196	-60÷+85
PK 50-9-12	K116	7x0,95 М	9,0±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	12,2±0,4 ПВХ	213	-40÷+70
PK 50-9-14	K172	7x0,76 М	9,0±0,1 Р	0,15 МО 88–92	12,6±1,5 ОАР	265	-40÷+45
PK 50-9-23	K236	7x1,01 МС	9,0±0,3 Ф4	0,20 МС 88–92			
PK 75-9-12	K101	1x1,4 М	9,0±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	14,2±0,7 ОФКР	401	-60÷+200
PK 75-9-13	K100	1x1,4 М	9,0±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	12,2±0,4 ПВХ	189	-40÷+70
PK 75-9-13-C	K100	1x1,35 М	9,0±0,15 ПЭ	0,20 М 88–92	12,0±0,4 СПЭ	169	-60÷+85
PK 75-9-14	K171	1x1,35 М	9,0±0,3 ПЭ	0,20 М 88–92	12,0±0,4 СПЭ	166	-60÷+85
PK 50-11-11	K115	7x1,18 М	11,5±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	13,2±0,8 ОАВ	214	-50÷+70
PK 50-11-13	K116	7x1,18 М	11,5±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	14,5±0,4 СПЭ	277	-60÷+85
PK 50-11-21	K204	7x1,3 МС	11,5±0,2 Ф4	0,20 МС 88–92	14,5±0,4 ПВХ	305	-40÷+70
PK 50-13-17	K115	7x1,33 М	13,0±0,4 ПЭ	0,2–0,3 М 88–92	13,4±0,8 ОФОС	427	-60÷+200
PK 75-13-11	K110	1x1,95 М	13,0±0,25 ПЭ	0,20 М 88–92	17,2±0,7 СПЭ	403	-60÷+85
PK 75-13-18	K161	49x0,26 М	13,0±0,4 ПЭ	0,30 М 88–92	16,6±0,5 СПЭ	303	-60÷+85
PK 50-17-17	K133	19x1,03 М	17,3±0,4 ПЭ	0,2–0,3 М 88–92	17,4±0,7 ПВХ	380	-50÷+70
PK 75-17-12	K100	1x2,63 М	17,3±0,4 ПЭ	0,20 М 88–92	21,7±0,8 СПЭ	610	-60÷+85
PK 75-17-22	K255	1x3,05 М	17,3±0,4 Ф4	0,30 М 88–92	21,0±0,5 СПЭ	511	-60÷+85
PK 50-24-17	K146	37x1,0 М	24,0±0,7 ПЭ	0,2–0,3 М 88–92	22,1±1,0 ОФКР	942	-60÷+200
PK 75-24-18	K161	49x0,44 М	24,0±0,7 ПЭ	0,30 М 88–92	29,0±1,1 ПВХ	950	-50÷+70
PK 50-33-17	K146	37x1,37 М	33,0±0,8 ПЭ	0,30 М 88–92	38,6±1,5 СПЭ	1770	-60÷+85
PK 50-44-17	K146	37x1,81 М	44,0±1,0 ПЭ	0,2–0,3 М 88–92	50,4±1,7 СПЭ	2966	-60÷+85

* Без оболочки.

** Допускается второй диапазон смены температур от -150 до +125° С.

Условные обозначения:

Приводники: М – медь мягкая; МТ – медь твердая; С – защитное покрытие из олова; А – алюминий мягкий; БР – бронза; СМ – биметаллическая стальмедьная проволока; МО – биметаллическая медная луженная олово-никелевым сплавом проволока; МС – биметаллическая медная посеребренная проволока; БРС – биметаллическая бронзовая посеребренная проволока; МТС – биметаллическая медная твердая посеребренная проволока; СМС – триметаллическая стальмедьная посеребренная проволока; ТРМ – трубка медная. **Материалы сплошной изоляции и оболочек:** ПЭ – полиэтилен низкой плотности; СПЭ – сверхстабилизированный полиэтилен; ПЭВИ – поливинилхоргидридиный пластик; Ф4 – фторопласт-4 плоточный; Ф4Д – фторопласт-4Д; Ф4МБ – фторопласт-4МБ; Ф4ОШ – фторопласт-4ОШ; Р – резина; КР – кремнийорганическая резина. **Комбинированные типы изоляции:** ДФО – сплошная, в виде двухслойной обмотки фторопластовыми лентами различных сортов: 1-й слой из Ф4; 2 слой из СКЛ; ДОФ – сплошная, в виде двухслойной обмотки фторопластовыми лентами различных сортов: 1-й слой из СКЛ, 2-й из Ф4; ТОФ – сплошная, в виде трехслойной обмотки фторопластовыми лентами различных сортов: 1-й слой из лент СКЛ; 2-й слой из лент Ф4; ТРФ – полуводоупорная, в виде трубы из Ф4МБ; ТРПЭ – полуводоупорная, в виде трубы из ПЭ и лентами из Ф4; ОФКП – полуводоупорная, в виде обмотки лентами из Ф4 и кордделем из Ф4Д; КПОФ – полуводоупорная, в виде обмотки лентами из Ф4 и кордделем из Ф4; КПД – полуводоупорная, обмотка кордделем из ПЭ и трубка из ПЭ; ТКПП – полуводоупорная трехслойная: 1-й и 3-й слой в виде трубок из ПЭ, 2-й слой в виде обмотки кордделем из ПЭ, ПМПЭ – полуводоупорная двухслойная: 1-й слой из пористого ПЭ, 2-й слой из монолитного ПЭ.

Комбинированные типы оболочек (защитных покровов): ОФКР – оболочка в виде обмотки лентами Ф4 и трубки из КО резины; ОФР – оболочка в виде обмотки лентами Ф4 и трубки из резины ИНБ-45УТ; ОФФ – оболочка в виде обмотки лентами ПК-4 (или ПЭТФ) и трубки из ПВХ; ДРУ – оболочка двухслойная из резины ИНН-45УТ, усиленная оплеткой из лавсановых нитей (между оболочками) и имеющая обмотку из лент Ф4 под внутренним шлангом; ДРУС – то же самое, что и ДРУ, но с панцирной оплеткой из жестостойких стальных проволок; ОФОС – защитный покров в виде обмотки лентами Ф4 и оплетки спиральными, пропитанной КО лаком; ОАР – оболочка в виде обмотки лентами ПК-4 (или ПЭТФ) и трубки из резины; ОАП – оболочка в виде обмотки лентами ПЭТФ (или прорезиненными) и трубки из сверхстабилизированного полиэтилена.

Таблица 7.2. Электрические параметры коаксиальных гибких радиочастотных кабелей со сплошной изоляцией

Марка кабеля	Волновое сопротивление, Ом	C, пФ/м	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/номинальная мощность на входе, Вт, при $T_{окр} = 313$ К (40°C) и частотах	U исп, кВ				R_1 , Ом/км
					0,2 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц	
PK 50-0,6-11	50±5	100	1,52	1,0/16	2,20/7	3,9/4	—	0,6	0,3
PK 50-0,6-21	50±10	96	1,41	0,95/40	2,13/13	3,8/7	7,0/3	0,6	0,3
PK 50-0,6-22	50±10	96	1,41	0,95/40	2,13/13	3,8/7	7,0/3	0,6	0,3
PK 50-0,6-23	50±5	95	1,43	0,90/50	2,17/17	4,0/8	7,3/3,5	0,6	0,3
PK 50-0,6-24	50±5	95	1,41	0,95/30	2,30/10	4,5/5	—	0,6	0,3
PK 50-1-11	50±2,5	100	1,52	0,57/40	1,4/15	2,5/7	—	1,2	0,6
PK 50-1-12	50±2,5	100	1,52	0,60/38	1,5/14	2,9/7	—	1,2	0,6
PK 50-1-13	50±3,5	100	1,52	0,58/38	1,5/14	2,8/7	—	1,0	0,6
PK 50-1-21	50±3,5	95	1,44	0,59/140	1,3/60	2,4/33	—	1,2	0,6
PK 50-1-22*	50±5	95	1,42	0,53/145	1,4/62	2,7/34	6,0/18	1,0	0,5
PK 50-1-22	50±5	95	1,42	0,53/140	1,4/60	2,7/33	6,0/18	1,0	0,5
PK 50-1-24	50±2	95	1,43	0,50/140	1,3/60	2,6/33	6,1/18	1,0	0,7
PK 50-1-25, C	50±5	95	1,42	0,53/140	1,4/60	2,5/33	5,5/18	1,2	0,6
PK 50-1-26	50±2	95	1,41	0,50/85	1,4/35	2,7/20	—	1,0	0,7
PK 75-1-11	75±3,5	67	1,52	0,60/40	1,4/15	2,5/7	—	1,0	0,5
PK 75-1-12	75±3,5	67	1,52	0,64/38	1,5/14	2,7/7	—	1,0	0,5
PK 75-1-13	75±5	67	1,52	0,62/38	1,43/14	2,55/7	—	1,0	0,5
PK 75-1-21	75±5	63	1,44	0,60/130	1,3/60	2,4/33	—	1,0	0,5
PK 75-1-22	75±3	64	1,44	0,62/130	1,4/60	2,5/33	5,0/18	1,0	0,5
PK 75-1-23*	75+7	63	1,41	0,62/135	1,4/62	2,5/34	—	1,0	0,5
PK 75-1-24	75±3	64	1,41	0,65/86	1,45/35	2,7/20	5,5/10	1,0	0,5
PK 50-1,5-11	50±2	100	1,52	0,46/49	1,20/19	2,1/10	—	1,8	0,9
PK 50-1,5-12	50±2	100	1,52	0,47/45	1,25/17	2,2/9	—	1,8	0,9
PK 50-1,5-21	50±2	96	1,44	0,44/285	1,10/122	1,9/69	—	2,0	2,10

PK 50-1,5-23, C	$50 \pm 3,5$	95	1,42	0,45/285	1,15/122	2,0/69	3,9/36	1,8	0,9	110
PK 50-1,5-26	50 ± 2	95	1,41	0,45/189	1,18/75	2,2/40	—	1,8	0,9	130
PK 75-1,5-11	75 ± 3	67	1,52	0,44/50	1,15/20	2,0/10	—	1,5	0,7	900
PK 75-1,5-12	75 ± 3	67	1,52	0,45/45	1,20/18	2,1/9	—	1,5	0,7	930
PK 75-1,5-21	75 ± 3	64	1,44	0,42/285	1,05/125	1,85/70	—	1,5	0,7	660
PK 75-1,5-22	75 ± 3	64	1,42	0,43/285	1,10/125	1,90/70	3,6/36	1,5	0,7	380
PK 75-1,5-23	75 ± 3	64	1,41	0,43/190	1,15/75	2,0/40	3,7/20	1,8	0,7	380
PK 50-2-11	50 ± 2	100	1,52	0,27/120	0,60/54	1,2/30	—	3	1,5	50
PK 50-2-12	50 ± 2	100	1,52	0,28/120	0,62/54	1,25/30	—	2,2	1,1	60
PK 50-2-13	50 ± 2	100	1,52	0,27/90	0,60/40	1,2/23	—	3	1,5	50
PK 50-2-15	50 ± 2	100	1,52	0,27/110	0,60/50	1,2/28	—	3	1,5	50
PK 50-2-16	50 ± 2	100	1,52	0,31/155	0,68/52	1,4/29	—	2,2	1,1	61
PK 50-2-21	50 ± 2	95	1,42	0,25/415	0,55/190	1,1/110	—	3	1,5	43
PK 50-2-22	50 ± 2	96	1,44	0,26/415	0,58/190	1,16/110	—	2,2	1,1	50
PK 50-2-23	50 ± 2	95	1,42	0,25/400	0,55/180	1,1/105	2,3/60	3	1,5	43
PK 50-2-24	50 ± 3	95	1,42	0,26/415	0,58/190	1,16/110	—	3	1,5	53
PK 50-2-26	50 ± 3	95	1,43	0,28/410	0,62/185	1,25/107	2,6/63	3	2	55
PK 50-2-27, C	50 ± 3	95	1,42	0,26/415	0,58/190	1,16/110	2,4/65	2,2	1,1	53
PK 75-2-11	75 ± 3	67	1,52	0,27/120	0,60/54	1,2/30	—	2,6	1,3	170
PK 75-2-12	75 ± 3	67	1,52	0,28/120	0,62/54	1,25/30	—	1,9	0,9	240
PK 75-2-13	75 ± 3	67	1,52	0,31/115	0,68/52	1,4/29	—	1,9	0,9	245
PK 75-2-21	75 ± 3	63	1,42	0,25/415	0,55/190	1,1/110	—	2,6	1,3	140
PK 75-2-22	75 ± 3	64	1,44	0,26/415	0,58/190	1,16/110	—	1,9	0,9	160
RKTP	43***	$\leqslant 130$ 1,42**0,25/400				—	—	3	—	38
RKTP-71	65***	65—	1,41	0,5/250	—	—	—	3	—	160
		85	65—	1,41	0,5/250	—	—	3	—	160
RKTF-71 M	65***	65—85 1,41 0,5/250				—	—	3	—	49
RK30C-19	$50 \pm 4,5$	$\leqslant 130$ 1,60** —				—	—	3	—	63
RK30C-63	$50 \pm 4,5$	$\leqslant 140$ 1,60** —				—	—	3	—	28
PK 50-3-11	50 ± 2	100	1,52	0,22/200	0,50/70	0,90/43	—	4	2	2
PK 50-3-13	50 ± 2	100	1,52	0,22/170	0,50/55	0,90/35	—	4	2	28

Продолжение табл. 7.2

Марка кабеля	Волновое сопротивление, Ом	$C, \text{пФ/м}$	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/номинальная мощность на входе Вт, при $T_{окр} = 313\text{ К}$ (40°C) и		$U_{иси}, \text{кВ}$	$U_{кор}, \text{кВ}$	$R_1, \text{Ом/км}$
				0,2 ГГц	1 ГГц			
PK 50-3-21	50±2	95	1,42	0,19/630	0,43/260	0,78/130	—	4,2
PK 50-3-23	50±2	95	1,42	0,20/630	0,45/260	0,82/130	1,7/60	4
PK 50-3-26	50±2,5	95	1,42	0,20/600	0,45/245	0,82/120	—	4,2
PK 50-3-27	50±2,5	95	1,42	0,20/600	0,45/245	0,82/120	—	4,2
PK 75-3-15	75±3	67	1,52	0,22/160	0,5/50	—	—	3
PK 75-3-16 АУ	75±3	67**	1,52**/0,22/170	0,5/55	—	—	3	1,5
PK 75-3-21	75±3	63	1,42	0,19/630	0,43/260	0,78/130	—	—
PK 75-3-22	75±3	63	1,42	0,20/630	0,45/260	0,82/130	1,7/60	3,6
PK 75-3-23*	75+7 -5	63	1,42	0,20/650	0,45/270	0,82/135	1,7/62	3,6
PKY-63	53**	90–130	1,52	—	—	—	—	1,8
PK-74	75+0 -13	96	1,52**/0,22/—	—	—	—	—	92
PK 50-4-11	50±2	100	1,52	0,14/350	0,33/150	0,63/80	2,0/30	6
PK 50-4-11-С	50±1	100	1,52	0,14/350	0,33/150	0,63/80	2,0/30	6
PK 50-4-13	50±2	100	1,52	0,14/350	0,33/150	0,63/80	2,0/30	6
PK 50-4-14	50±2	94	1,41	0,14/350	0,33/150	—	—	5
PK 50-4-14-ОИ	50±2	94	1,41	0,14/350	0,33/150	—	—	2,5
PK 50-4-15	50±2	94	1,41	0,14/350	0,33/150	—	—	2,5
PK 50-4-21	50±2	94	1,41	0,14/1000	0,30/400	0,6/200	1,8/110	6,4
PK 75-4-11	75±3	67	1,52	0,15/320	0,36/130	0,7/70	—	5
PK 75-4-11-С	75±1,5	67	1,52	0,15/320	0,36/130	0,7/70	—	5
PK 75-4-12	75±3	67	1,52	0,16/300	0,38/120	0,8/60	—	6
PK 75-4-12-С	75±1,5	67	1,52	0,16/300	0,38/120	0,8/60	—	6

PK 75-4-13	75±3,0	67	1,52	0,16/300	0,38/120	0,8/60	-	-	5	2,0	50
PK 75-4-15	75±2,5	67	1,52	0,15/320	0,36/130	0,7/70	-	-	5	2,5	42,5
PK 75-4-16	75±2,5	67	1,52	0,16/320	0,38/120	0,8/60	-	-	5	2,0	48
PK 75-4-18	75±3	67	1,52	0,16/320	0,38/120	0,8/60	2,0/30	-	5	2,5	42,5
PK 75-4-110	75±3	67	1,52	0,16/320	0,38/120	0,8/60	-	-	5	2	48
PK 75-4-111	75±3	67	1,52	0,16/320	0,38/120	0,8/60	-	-	5	2	48
PK 75-4-112	75±3	67	1,52	0,16/320	0,38/120	0,8/60	-	-	5	2	48
PK 75-4-21	75±3	63	1,41	0,14/1000	0,30/400	0,6/200	-	-	5	2,5	31
PK 75-4-22	75±3	63	1,41	0,15/900	0,33/380	0,55/180	-	-	5	2,5	36
PK 75-4-22	75±6	≤95	1,60**	-	-	-	-	-	7	-	48
PK 3ΦC-1	48-53	95**	1,42**	0,17/-	-	-	-	-	2	-	6,5
PKΦ-1	50±2	100	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/150	-	-	10	4	5,7
PK 50-7-11	50±1	100	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/150	-	-	10	4	5,7
PK 50-7-11-C	50±1	100	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/150	-	-	10	4	5,7
PK 50-7-12	50±2	100	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/150	1,5/40	-	10	4	5,7
PK 50-7-15	50±2	100	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/150	-	-	10	4	5,7
PK 50-7-16	50±2	100	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/150	1,5/40	-	10	5	5,7
PK 50-7-21	50±2	94	1,41	0,10/2400	0,28/800	0,53/450	-	-	9	4	4,8
PK 50-7-22	50±2	94	1,41	0,095/2500	0,26/900	0,52/500	1,3/270	10	5	4,8	
PK 50-7-28	50±2	94	1,41	0,095/2600	0,26/950	0,52/520	1,3/280	9	5	4,8	
PK 75-7-11	75±3	67	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/140	-	-	8	4	17,5
PK 75-7-12	75±2,5	67	1,52	0,11/550	0,30/220	0,55/130	-	-	8	3	21
PK 75-7-15	75±2,5	67	1,52	0,10/600	0,27/250	0,52/140	-	-	8	4	17,5
PK 75-7-16	75±2,5	67	1,52	0,11/550	0,30/220	0,55/130	-	-	8	3	21
PK 75-7-21	75±3	63	1,41	0,10/2500	0,27/800	0,52/500	-	-	10	5	13
PK 75-7-22	75±3	63	1,41	0,11/2400	0,29/750	0,55/450	-	-	8	4	15,5
PK 100-7-11	100±5	51	1,52	0,12/400	0,31/200	0,6/120	-	-	6	3	62
PK 100-7-13	100±5	51	1,52	0,12/400	0,31/200	0,6/120	-	-	6	3	62
PK 100-7-21	100±5	47	1,41	0,11/2100	0,27/700	0,55/400	-	-	6,2	3,1	41
PK 50-9-11	50±2	100	1,52	0,086/1000	0,22/400	0,45/200	-	-	10	5	4
PK 50-9-12	50±2	100	1,52	0,09/900	0,25/380	0,50/170	-	-	10	5	4
PK 50-9-14	50±5	117	1,76	0,22/400	-	-	-	-	3	-	5,7

Марка кабеля	Волновое сопротив- ление, Ом	C_1 , пФ/м	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/нормальный мощность на входе, Вт, при $T_{окр} = 31,3$ К (40°C) и					R_1 , Ом/км
				0,2 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц		
PK 50-9-23	50±2	94	1,41	0,085/3000	0,27/1200	0,45/700	-	5	4
PK 75-9-12	75±2,5	67	1,52	0,090/800	0,27/380	0,52/170	-	10	5
PK 75-9-13	75±2,5	67	1,52	0,090/800	0,25/380	0,50/170	-	9	4,5
PK 75-9-13-C	75±1,5	67	1,52	0,086/1000	0,22/400	0,45/200	-	9	4,5
PK 75-9-14	75±3	67	1,52	0,086/1000	0,22/400	0,45/200	-	9	4,5
PK 50-11-11	50±2	100	1,52	0,081/100	0,30/450	0,50/200	-	14	5,5
PK 50-11-13	50±2	100	1,52	0,09/1000	0,35/400	0,55/180	-	14	5,5
PK 50-11-21	50±2	94	1,41	0,084/200	0,20/1600	0,40/800	-	12	6
PK 50-13-17	50±2	100	1,52	0,06/1200	0,17/400	-	-	10	7
PK 75-13-11	75±3	67	1,52	0,06/1200	0,18/400	0,40/200	-	12	6
PK 75-13-18	75±3	67	1,52	0,08/800	0,20/300	-	-	10	6
PK 50-17-17	50±2	100	1,52	0,055/1600	0,16/500	-	-	10	9
PK 75-17-12	75±3	67	1,52	0,055/1800	0,16/600	0,35/300	-	18	8
PK 75-17-22	75±3	63	1,4	0,060/5200	0,15/2000	-	-	10	8
PK 50-24-17	50±2	100	1,52	0,045/2500	0,13/650	-	-	25	13
PK 75-24-18	75±3	67	1,52	0,07/1500	0,18/600	-	-	25	12
PK 50-33-17	50±2	100	1,52	0,04/4000	0,12/900	-	-	25	17
PK 50-44-17	50±2	100	1,52	0,032/5000	0,10/1000	-	-	25	22

* Без оболочки.

** В ТУ соответствующие данные не приводятся.

Таблица 7.3. Конструктивные параметры коаксиальных гибких радиочастотных кабелей с полувоздушной изоляцией

Марка кабеля	Конструтивная схема	Конструкция материала изоляции	Конструкция и материал внешнего проводника	Наружный диаметр, мм	Масса, кг/км	$R_{\text{изгтmin}}$, мм	Рабочие температуры, °C
PK 100-1-41	K400	1x0,18 БРС	1,0 ^{+0,15} _{-0,10} ТРФ	0,06 МС 65–80	1,25 ^{+0,15} _{-0,10} –	2,8	6, II
PK 100-1-42	K401	1x0,18 БРС	1,0 ^{+0,10} _{-0,15} ТРФ	0,06 МОН 65–80	1,25 ^{+0,10} _{-0,15} –	2,9	6, II
PK 100-1,5-31	K310	1x0,23 МО	1,5 ^{+0,1} _{-0,1} КПТЭ	0,10 МО 50–60	1,9 ^{+0,1} _{-0,1} –	4,2	20 –60 ^{÷+85}
PK 100-1,5-42	K401	1x0,23 БРС	1,5 ^{+0,15} _{-0,15} ТРФ	0,08 МОН 65–80	1,85 ^{+0,15} _{-0,15} –	4,4	10, II –60 ^{÷+155}
PK50-2-34	K319	19x0,15 МО	2,2 ^{+0,1} _{-0,1} КПОФ	0,10 МО 88–93	≤2,7 –	14,4	15, II –60 ^{÷+85}
PK 200-2-31	K308	1x0,07 НИХР	2,2 ^{+0,1} _{-0,1} ПМПЭ	0,10 МО 85–92	3,7 ^{+0,3} _{-0,3} ПВХ	17,5	30 –50 ^{÷+80}
PK 75-3-31	K318	7x0,23 МО	3,05 ^{+0,1} _{-0,1} ТКПП	0,12 МО 88–92	5,0 ^{+0,2} _{-0,2} СПЭ	28,3	30 –60 ^{÷+85}
PK 100-3-31	K316	7x0,15 МО	3,0 ^{+0,15} _{-0,15} ТРПЭ	0,12–0,15 МО 70–85	3,5 ^{+0,25} _{-0,25} –	15,1	30 –60 ^{÷+85}
PKOF-2М	K314	10x0,08 М	2,65 ^{+0,15} _{-0,15} ОФКП	0,10 МО ≥85	≤3,3 –	12,4	8, II –60 ^{÷+85}
PKOFT	K408	19x0,13 МС	1,85 ^{+0,15} _{-0,15} ОФКФ	0,12 МО ≥85	≤2,7 –	19,2	20, II –60 ^{÷+200}
PK 150-3-7-31	K312	1x0,26 ЗИГМ	3,7 ^{+0,3} _{-0,3} ТРПЭ	0,12 М 80–90	5,3 ^{+0,3} _{-0,3} ПВХ	32,6	20 –40 ^{÷+70}
PK 156	K321	1x0,64 СМ	3,7 ^{+0,25} _{-0,25} КПТЭ	0,15 МО 88–92	6,2 ^{+0,4} _{-0,4} СПЭ	60	30 –60 ^{÷+85}
PK 50-4-42	K402	7x0,62 МС	4,6 ^{+0,2} _{-0,2} КФОФ	0,15 МС 88–92	6,7 ^{+0,4} _{-0,4} ОФФ	94,5	60 –60 ^{÷+200}
PK 50-4-46	K409	19x0,32 МС	4,6 ^{+0,2} _{-0,2} КФОФ	0,15 М ≥89	8,1 ^{+0,4} _{-0,4} ОФКР	107	80 –150 ^{÷+200} +200 –60 ^{÷+85}
PK 75-4-37	K300	1x1,03 М	4,6 ^{+0,25} _{-0,25} КПТЭ	0,15 М 88–92	6,5 ^{+0,25} _{-0,25} СПЭ	54	40 –60 ^{÷+85}
PK 75-4-39	K322	7x0,37 МС	4,6 ^{+0,3} _{-0,3} КПТЭ	0,15 МC ≥96	0,15 М ≥96	131	100 –60 ^{÷+85}
PK 75-4-43	K406	7x0,30 МС	4,6 ^{+0,2} _{-0,2} КФОФ	0,15 МC 88–92	6,0 ^{+0,4} _{-0,4} Ф4	78	30 –60 ^{÷+200}
PK 75-4-44	K410	7x0,30 МС	4,6 ^{+0,2} _{-0,2} КФОФ	0,15 МC ≥89	8,1 ^{+0,4} _{-0,4} ОФКР	101	50 –150 ^{÷+200}

Продолжение табл. 7.3

234

Марка кабеля	Конструкция и материал внутреннего проводника	Конструкция и материал изоляции	Конструкция и термал внешнего проводника	Наружный диаметр, мм, и материа- л оболочки	Масса, кг/км	$R_{\text{изгр.мин.}}$, м	Рабочая темпера- тура, С
РКТФ-56	K411 K321	1x0,64 CM 1x0,64 CM	4,6±0,3 КФОФ 4,6±0,2 КТПЭ	0,15–0,2 М 88–92 0,15 МО 88–92	6,2±0,4 ОФОС	76	40 –60÷200
РК 100-4-31				0,15 МО 88–92	7,3±0,4 СПЭ	84	70 –60÷+85
PK 150	K323	1x0,30 М	6,2±0,3 ТРПЭ	0,15–0,2 М 88–92	8,8±0,5 СПЭ	86	50 –40÷+85
PK 50-7-46	K406	7x0,85 МС	7,25±0,3 КФОФ	0,15 МС 88–92	8,7±0,5 Ф4	167	50 –60÷+200
PK 75-7-37	K300	1x1,62	7,25±0,3 КТПЭ	0,15 М 88–92	9,85±0,3 СПЭ	111	50 –60÷+85
PK 75-7-310	K311	1x1,75 МС	7,25±0,3 КТПЭ	0,15 МС 88–92	10,5±0,3 СПЭ	112	100 –60÷+85
PK 75-7-311	K324	1x1,75 М	7,25±0,3 КТПЭ	0,15 МС 88–92	10,5±0,3 СПЭ	151	100 –60÷+85
PK 100-7-34	K301	1x1,0 МТ	7,25±0,3 КТПЭ	0,15 М 88–92 0,15 М ≥88	10,0±0,3 СПЭ	99	50 –60÷+85
PK 150-7-31	K325	1x0,37 ЗСМО	7,25±0,3 ТРПЭ	0,15 М 88–92	10,0±0,3 СПЭ	87	100 –60÷+85
PK 150-7-32	K326	1x0,37 ЗСМО	7,25±0,3 ТРПЭ	0,15 М 88–92	10,0±0,3 ПВХ	100	100 –40÷+70
PK 50-9-44	K409	19x0,6 МС	9,0±0,3 КФОФ	0,20 МС 88–92 0,20 М 88–92	14,0±0,5 ОФКР	291	70 –150÷ +200
PK 75-9-31	K311	1x2,2 МС	9,0±0,3 КТПЭ	0,20 МС ≥96	12,0±0,8 СПЭ	184	120 –60÷+85
PK 75-9-32	K313	1x2,22 МС	9,0±0,3 КТПЭ	0,20 МО ≥96	12,2±0,2 СПЭ	189	120 –60÷+85
PK 75-9-35	K327	7x0,74 МС	9,0±0,3 КТПЭ	0,20 МС 88–92 0,20 М 88–92	12,8±0,6 СПЭ	226	120 –60÷+85
PK 75-9-42	K407	7x0,60 МС	9,0±0,3 КФОФ	0,20 МС 88–92	10,6±0,7 ОФОС 230	60	–60÷+200
PK 50-11-34	K311	1x4,2 МС	11,5±0,5 КТПЭ	0,30 МС ≥96	14,4±0,4 СПЭ	347	140 –60÷+85

Таблица 7.4. Электрические параметры коаксиальных гибких радиочастотных кабелей с полу воздушной изоляцией

Марка кабеля	Волновое сопротивление, Ом	C, пФ/м	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/нominальная мощность на входе, Вт, при $T_{окр} = 40^{\circ}\text{C}$ и частотах				$U_{исп, кВ}$	$U_{кор, кВ}$	$R_1, \text{Ом}/\text{км}$
				0,2 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц			
PK 100-1-41	100±10	40	1,2	0,8/-	-	-	-	0,3	-	800
PK 100-1-42	100±10	40	1,2	0,9/-	-	-	-	0,3	-	800
PK 100-1,5-31	100±10	40	1,2	1,0/-	-	-	-	0,5	-	440
PK 100-1,5-42	100±10	40	1,2	0,8/-	-	-	-	0,5	-	500
PK 50-2-34	50±3	95*	1,49	0,5/120	1,6/50	3/30	7/15	-	-	55
PK 200-2-31	200	≤27	1,25	-	-	-	-	3	-	3·10 ⁵
PK 75-3-31	75±3	55	1,24	0,2/150	0,55/60	1,0/35	-	0,5	-	65
PK 100-3-31	100	≤45	1,16	0,18 при 0,045**	-	-	-	0,5	-	160
PKOT 2М	110-120	37,5± ±2,5	1,2	0,30/-	-	-	-	0,5	-	350
PKOTГ	50 ⁺⁶ -4	93	1,39	0,35/320	1,2/130	2,6/70	6,0/35	-	-	72
PK 150-3,7-31	150±6	30	0,03 при 0,001**	-	-	-	-	1	-	400
PK 156	87±4	48	1,2	0,30/-	0,7/-	1,2-	-	3	-	55
PK 50-4-42	50±2	80	1,2	0,13/900	0,32/360	0,60/180	1,8/100	1	-	8,6
PK 50-4-46	50±3	95	1,4	0,13/1000	0,32/450	0,60/250	-	1	-	12
PK 75-4-37	75±3	53	1,19	0,14/320	0,33/130	0,65/70	1,9/35	1	-	22
PK 75-4-39	75±3,5	60	1,19	0,14/320	0,33/130	0,65/70	1,9/35	1	-	25
PK 75-4-43	75±3	62	1,4	0,15/900	0,34/360	-	-	3	-	37
PK 75-4-44	75±3	63	1,4	0,15/950	0,34/400	0,57/200	-	1	-	37
РКТФ-56	77±5	50	1,15	0,22/-	0,47/-	0,8/-	-	3	-	55
PK 100-4-31	100±5	40	1,2	0,16/330	0,36/1120	0,70/65	-	2	-	55
PK 150	150±10	27	1,2	0,075 при 0,045**	-	-	-	1	-	250

Продолжение табл. 7.4

Марка кабеля	Волновое сопротивление, Ом	С, пФ/м	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/номинальная мощность на входе, Вт, при $T_{окр} = 40^\circ\text{C}$ и частотах				$U_{нсп}, \text{кВ}$	$U_{кор}, \text{кВ}$	$R_{11}, \text{Ом/км}$
				0,2 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц			
PK 50-7-46	50±2	93	1,4	0,09/2200	—	—	—	—	—	4,5
PK 75-7-37	75±3	54	1,21	0,08/550	0,23/230	0,45/130	1,0/65	1	—	8,5
PK 75-7-310	75±3	52	1,18	0,07/570	0,22/240	0,42/130	0,9/65	1	—	7,2
PK 75-7-311	75±3	52	1,18	0,08/550	0,23/230	0,42/130	0,9/65	1	—	7,2
PK 100-7-34	100±5	41	1,23	0,085/450	0,30/200	0,5/115	1,2/60	1	—	24
PK 150-7-31	150±10	29	1,18	0,18/75	0,55/40	1,0/27	—	1	—	450
PK 150-7-32	150±10	29	1,18	0,18/75	0,55/40	1,0/27	—	1	—	450
PK 50-9-44	50±3	95	1,4	0,08/2800	0,23/1100	0,40/650	—	1	—	3,5
PK 75-9-31	75±3	50	1,1	0,075/700	0,19/300	0,35/170	—	2	—	4,6
PK 75-9-32	75±3	50-	1,1	0,08/700	0,20/300	0,38/300	—	2	—	4,6
PK 75-9-35	75±3	51	1,15	0,08/700	0,20/300	0,38/170	—	2	—	6
PK 75-9-42	75±3	58	1,29	0,075/1800	0,18/700	0,30/400	—	1	—	9
PK 50-11-34	50±2,5	80	1,16	0,070/900	0,16/380	0,27/200	—	2	—	1,3

*Расчетное значение.

** Нормируется коэффициент затухания на указанной частоте в гигагерцах.

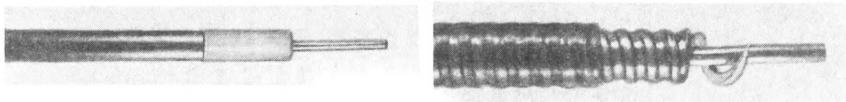


Рис. 7.3. Коаксиальный полужесткий кабель РК 50-3-28-Пр классической конструкции со сплошной изоляцией и трубчатым гладким внешним проводником

Рис. 7.4. Коаксиальный полужесткий кабель РК 50-7-58-С с воздушной кордельной изоляцией и гофрированным сварным внешним проводником

не нормируется напряжение начала внутренних разрядов в изоляции. Конструктивные характеристики показаны в табл. 7.3, а электрические параметры – в табл. 7.4.

Полужесткие коаксиальные кабели классической схемы (в гладких трубках) (рис. 7.3) представлены преимущественно субминиатюрными и миниатюрными конструкциями. Перспективность этой группы кабелей связана с малым коэффициентом затухания, высокой стабильностью электрических параметров, работоспособностью в диапазоне миллиметровых длин волн, возможностью применения бесштыревых соединителей, отличными экранными свойствами [17]. Конструкции и свойства кабелей приводятся в табл. 7.5 и 7.6.

Полужесткие коаксиальные кабели со сварными гофрированными внешними проводниками (рис. 7.4) представлены среднегабаритными и крупногабаритными конструкциями. Обладая высокими электрическими параметрами, подобно полужестким классическим, кабели этой группы обладают определенной гибкостью, допускают несколько десятков двойных перегибов (П) или перемоток (Б). Применение более глубокого гофрирования и с уменьшенным шагом (РК 50-3,7-31; РК 50-4-31; РК 50-4-32; РК 50-4-47; РК 50-4-48; РК 50-5-41; РК 50-5-42) увеличивает стойкость кабелей к перегибам.

Почти все кабели с гофрированными внешними проводниками нормируются по коэффициенту отражения и температурному коэффициенту фазы (изменению коэффициента фазы под действием температуры). Наименьшим ТКФ обладают кабели РК 50-7-58-С, СГ; РК 50-7-59-С, СГ; РК 50-17-51-С, СГ, имеющие воздушную изоляцию из прямоугольного полиэтиленового корделя. Кабели РК 50-4-47, С; РК 50-4-48, С; РК 50-5-41, С и РК 50-5-42, С работоспособны в диапазоне частот до 18 ГГц.

Благодаря указанным свойствам полужесткие гофрированные кабели могут использоваться в качестве прецизионных соединительных линий с ограниченной подвижностью, например, в радиоизмерительных приборах. Конструктивные характеристики и электрические параметры приведены в табл. 7.7 и 7.8.

Коаксиальные гибкие кабели с внешним проводником в виде повива плоских проволок изготавливаются только крупногабаритными, с диа-

Таблица 7.5. Конструктивные параметры коаксиальных полужестких радиочастотных кабелей в гладких трубках

Марка кабеля	Конструкция и материал внутреннего проводника	Конструкция и материал изоляции	Толщина и материал внешнего покрытия	Наружный диаметр, мм, и материал термал покрытия	$R_{изгmin}$, мм	Рабочие температу- ры, °C
PK 50-0,3-21-C	K511	1x0,10 БРС	0,30 ^{+0,02} _{-0,05} Ф4МБ	0,07 М	0,45±0,05 –	1,08
PK 37-0,6-21-C	K512	1x0,25 МТС	0,6–0,06 Ф4МБ	0,10 М	0,8±0,05 –	3,2
PK 50-0,6-25-C	K511	1x0,18 БРС	0,6–0,06 Ф4МБ	0,10 М	0,8±0,05 –	3,13
PK 50-1-23, C	K500	1x0,32 СМС	1,0±0,05 Ф4Д	0,25 М	1,5±0,05 –	14,6
PK 50-1,5-22, C	K500	1x0,47 СМС	1,5±0,05 Ф4Д	0,25 М	2,0±0,05 –	21,0
PK 50-2-25	K503	1x0,68 МС	2,2±0,05 Ф4Д	0,30 М	2,8±0,05 –	36,3
PK 50-2-25-C	K500	1x0,68 СМС	2,2±0,05 Ф4Д	0,30 М	2,8±0,05 –	36,3
PK 50-3-22	K505	1x0,96 МС	2,95 ^{+0,15} _{-0,10} Ф4Д	0,25 М	3,5±0,1 С	46,1
PK 50-3-28-Пр	K500	1x0,895 СМС	2,95 Ф4Д	0,25 М	3,43±0,05 –	41,5
PK 50-3-29-Пр	K506	1x0,895 СМС	2,95 Ф4	0,25 М	3,43±0,05 –	41,5
PK 50-4-27, С	K513	1x1,42 М	4,6±0,1 ДФО	0,3 М	5,2±0,1 –	90,3
PK 50-7-29	K508	1x2,24 М	7,25 ^{+0,1} _{-0,2} Ф4	1,0 А	9,2 ^{+0,3} _{-0,5} –	135
					192	50
						-60 ^{÷+200}

Таблица 7.6. Электрические параметры коаксиальных полужестких радиочастотных кабелей в гладких трубках

Марка кабеля	Волновое сопротивление, Ом	$C, \text{ пФ/м}$	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/номинальная мощность на входе Вт, при $T_{окр} = 40^\circ \text{ С и частотах}$	$U_{\text{исп}}, \text{ кВ}$	$U_{\text{кор}}, \text{ кВ}$	$R_1, \text{ Ом/м}$			
				0,2 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц			
PK 50-0,3-21-C	50±5	95	1,41	1,6/2,5	3,8/0,7	6,0/0,3	1,2/0,12	0,3	—	2,6
PK 37-0,6-21-C	37,5±3	1,35	1,41	0,70/6	1,8/2	3,9/0,8	6/0,4	0,6	—	0,4
PK 50-0,6-25-C	50±3	95	1,41	0,70/6	1,8/2	3,9/0,8	6/0,4	0,6	—	0,8
PK 50-1-23,C	50±2	95	1,42	0,40/110	1,0/50	2,0/30	3,8/15	1,2	0,6	0,5
PK 50-1,5-22,C	50±2	95	1,42	0,35/160	0,80/70	1,5/40	3,0/20	1,8	0,9	0,25
PK 50-2-25	50±2	95	1,42	0,25/300	0,55/130	1,05/75	2,1/35	3	1,5	0,05
PK 50-2-25-C	50±2	95	1,42	0,25/300	0,55/130	1,05/75	2,1/35	3	1,5	0,11
PK 50-3-22	50±2	96	1,42	0,20/500	0,50/190	0,90/95	1,9/45	4	2	0,025
PK 50-3-28-Пр	50±1	94	1,41	0,18/500	0,45/190	0,80/95	1,7/45	4	2	0,065
PK 50-3-29-Пр	50±1	94	1,41	0,18/600	0,45/210	0,80/105	1,7/50	4	2	0,065
PK 50-4-27,C	50±2	94	1,41	0,09/1500	0,28/550	0,55/300	1,5/160	6	3	0,011
PK 50-7-29	50±2	94	1,41	0,07/1900	0,18/800	0,35/550	0,7/250	9	5	0,005

Таблица 7.7. Полужесткие радиочастотные кабели с медным сварным гофрированным внешним проводником

Марка кабеля	Конструктивная схема	Конструкция и материал изоляции внутреннего проводника	Диаметр, толщина и шаг гофрирования внешнего проводника	Наружный диаметр, мм, и материал оболочки	Масса, кг/км	$R_{изгтmin}$, рабочие температуры, °С
PK 50-3-7-31	K601	1x1,2 М	3,7±0,2 ПЭОФ	5,1±0,2/0,2/1,7	6,5±0,4 СПЭ	62
PK 50-3-7-31-С	K601	1x1,2 М	3,7±0,15 ПЭОФ	5,1±0,2/0,2/1,7	6,5±0,4 СПЭ	62
PK 50-4-31	K601	1x1,5 М	4,6±0,2 ПЭОФ	6,2±0,2/0,2/1,8	7,6±0,4 СПЭ	83
PK 50-4-31-С	K601	1x1,5 М	4,6±0,15 ПЭОФ	6,2±0,2/0,2/1,8	7,6±0,4 СПЭ	83
PK 50-4-32	K602	1x1,76 М	4,6±0,2 ППОФ	6,2±0,2/0,2/1,8	7,6±0,4 СПЭ	81
PK 50-4-32-С	K602	1x1,76 М	4,6±0,15 ППОФ	6,2±0,2/0,2/1,8	7,6±0,4 СПЭ	81
PK 50-4-25	K605	1x1,56 М	4,6±0,2 Ф4	6,3±0,2/0,3/2,4	7,1±0,4 Ф4МБ	125
PK 50-4-47	K605	1x1,6 М	4,6±0,2 Ф4	6,2±0,2/0,2/1,7	7,0±0,4 Ф4МБ	109
PK 50-4-47-С	K605	1x1,6 М	4,6±0,15 Ф4	6,2±0,2/0,2/1,7	7,0±0,4 Ф4МБ	109
PK 50-4-48	K604	1x1,6 М	4,6±0,2 Ф4	6,2±0,2/0,2/1,7	6,2±0,2 –	95
PK 50-4-48-С	K604	1x1,6 М	4,6±0,15 Ф4	6,2±0,2/0,2/1,7	6,2±0,2 –	95
PK 75-4-25	K605	1x0,9 М	4,6±0,2 Ф4	6,3±0,2/0,3/2,4	7,1±0,4 Ф4МБ	117
PK 50-5-41	K605	1x1,95 М	5,6±0,2 Ф4	7,3±0,2/0,2/2,1	8,1±0,4 Ф4МБ	134
PK 50-5-41-С	K605	1x1,95 М	5,6±0,15 Ф4	7,3±0,2/0,2/2,1	8,1±0,4 Ф4МБ	134
PK 50-5-42	K604	1x1,95 М	5,6±0,2 Ф4	7,3±0,2/0,2/2,1	7,3±0,2 –	119
PK 50-5-42-С	K604	1x1,95 М	5,6±0,15 Ф4	7,3±0,2/0,2/2,1	7,3±0,2 –	119
PK 50-7-31	K600	1x2,36 М	7,25±0,2 ПЭ	9,3±0,2/0,2/3,2	11,2±0,5 СПЭ	115
PK 50-7-31-С	K600	1x2,36 М	7,25±0,15 ПЭ	9,3±0,2/0,2/3,2	11,2±0,5 СПЭ	115
PK 50-7-58, Г	K609	1x3,2 М	7,25±0,2 КОРП	9,2±0,2/0,3/3,5	11,2±0,6 СПЭ	189
PK 50-7-58-С, СГ	K609	1x3,2 М	7,25±0,2 КОРП	9,2±0,2/0,3/3,5	11,2±0,6 СПЭ	189
PK 50-7-59, Г	K609	1x3,2 М	7,25±0,2 КОРП	9,2±0,2/0,3/4,0	11,2±0,6 СПЭ	197
PK 50-7-59-С, СГ	K609	1x3,2 М	7,25±0,15 КОРП	9,2±0,2/0,3/4,0	11,2±0,6 СПЭ	197

PK 50-7-4-17	K606	1x2,5 М	$7,25 \pm 0,25$ Ф4	$9,2 \pm 0,25 / 0,2 / 3,2$	$10,6 \pm 0,6$ КР	224	75, II	-60÷+200
PK 50-7-4-17-C	K606	1x2,5 М	$7,25 \pm 0,15$ Ф4	$9,2 \pm 0,25 / 0,2 / 3,2$	$10,6 \pm 0,6$ КР	224	75, II	-60÷+200
PK 50-13-51	K610	5,5 ТРМ	$1,32 \pm 0,2$ КОРП	$16,6 \pm 0,2 / 0,3 / 6,0$	$19,0 \pm 0,8$ СПЭ	203	150	-60÷+85
PK 50-17-51,Г	K610	7,5 ТРМ	$1,73 \pm 0,3$ КОРП	$21,3 \pm 0,3 / 0,3 / 7,0$	$24,3 \pm 0,8$ СПЭ	439	200, Б	-60÷+85
PK 50-17-51-С, СГ	K610	7,5 ТРМ	$17,3 \pm 0,3$ КОРП	$21,3 \pm 0,3 / 0,3 / 7,0$	$24,3 \pm 0,8$ СПЭ	439	200, Б	-60÷+85

Таблица 7.8. Электрические параметры коаксиальных полужестких радиочастотных кабелей с мицвильным сварным гофрированным внешним проводником

Марка кабелей	Волновое сопротивление, Ом	C_s пФ/м	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/номинальная мощность на входе, Вт, при $T_{окр} = 20^\circ\text{C}$ и частотах	$U_{исп}, \text{КВН}_{\text{max}}/\text{срТКФ}_{\text{max}},$ $1/10^6$ град		
					1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц
PK 50-3-7-31	50±2	100	1,5	0,38/135	0,68/75*	1,2/40	-
PK 50-3,7-31-C	50±1,5	100	1,5	0,38/135	0,68/75*	1,2/40	-
PK 50-4-31	50±2	100	1,5	0,30/200	0,53/115*	0,9/62	-
PK 50-4-31-C	50±1,5	100	1,5	0,30/200	0,53/115*	0,9/62	-
PK 50-4-32	50±2	85	1,3	0,26/190	0,45/100*	0,8/60	-
PK 50-4-32-C	50±1,5	85	1,3	0,26/190	0,45/110*	0,8/60	-
PK 50-4-25	50±3	95	1,4	0,31/500	-	-	6
PK 50-4-47	50±2	93	1,39	0,29/450	0,50/260*	1,15/160	1,53/120
PK 50-4-47-C	50±1,5	93	1,39	0,29/450	0,50/260*	1,15/160	1,53/120
PK 50-4-48	50±2	93	1,39	0,29/450	0,50/260*	1,15/160	1,53/120
PK 50-4-48-C	50±1,5	93	1,39	0,29/450	0,50/260*	1,15/160	1,53/120
PK 75-4-25	75±3	65	1,4	0,31/500	-	-	5
PK 50-5-41	50±2	94	1,39	0,20/900	0,40/500*	0,85/210	1,20/150
PK 50-5-41-C	50±1,5	94	1,39	0,20/900	0,40/500*	0,85/210	1,20/150

Продолжение табл. 7.8

Марка катушек	Волновое сопротив- ление, Ом	$C, \text{ пФ/м}$	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/м/номи- нальная мощность на входе, Вт, при $T_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$ и частотах		$U_{\text{нсп}}, \text{ кВН}_{\text{max}}/\text{срГКФ}_{\text{max}},$ $1/10^6$ град	
				1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц	18 ГГц
PK 50-5-42	50±2	94	1,39	0,20/900	0,40/500*	0,85/210	1,20/150
PK 50-5-42-С	50±1,5	94	1,39	0,20/900	0,40/500*	0,85/210	1,20/150
PK 50-7-31	50±2	100	1,5	0,22/600	0,45/340*	0,90/180	—
PK 50-7-31-С	50±1,5	100	1,5	0,22/600	0,45/340*	0,90/180	—
PK 50-7-58, Г	50±2	75	1,1	0,13/500	0,24/290*	—	—
PK 50-7-58-С, СГ	50±2	75	1,1	0,13/500	0,24/290*	—	—
PK 50-7-59, Г	50±2	75	1,1	0,13/500	0,24/290*	До 5 ГГц	—
PK 50-7-59-С, СГ	50±1,5	75	1,1	0,13/500	0,24/290*	До 5 ГГц	—
PK 50-7-417	50±2	94	1,4	0,16/2000	0,32/630*	0,70/340	—
PK 50-7-417-С	50±1,5	94	1,4	0,16/2000	0,32/630*	0,70/340	—
PK 50-13-51	50±2	74	1,11	0,10/1300	0,18/740	—	—
PK 50-17-51, Г	50±2	72	1,1	0,055/1700	0,11/900*	—	—
PK 50-17-51-С, СГ	50±1,5	72	1,1	0,055/1700	0,11/900*	—	—

* Нормируются по номинальной мощности на входе при частоте 2,375 ГГц.

** Нормируются также по выходу коэффициента фазы после механических воздействий (перемоток).

Таблица 7.9. Конструктивные параметры коаксиальных гибких радиочастотных кабелей с внешним проводником в виде повивы плоских проволок

Марка кабеля	Конструкт- руктив- ная схема	Конструкция и материал изоля- ции внутреннего проводника	Конструкция и Наружный ди- материал вспл.-метр. мм; мате- риал оболочки, защитные покро- вы	Масса, кг/км	Rизгтmin, мм	Рабочие температу- ры, °С		
PK 50-13-15	K147	1x3,6 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	16,4±0,7 СВ	1066	120	-60...+85
PK 50-13-15-Б	K148	1x3,6 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	26,8 МНБ	1783	180	-60...+85
PK 50-13-15-ОП	K149	1x3,6 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	17,6±0,7 МНОБ	1197	120	-60...+85
PK 75-13-15	K147	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	16,4±0,7 СВ	1012	120	-60...+85
PK 75-13-15-Б	K148	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	26,8 МНБ	1717	180	-60...+85
PK 75-13-15-ОП	K149	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	17,6±0,7 МНОБ	1142	120	-60...+85
PK 75-13-17	K156	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	17,5±0,7 ОАП	445	100	-60...+85
PK 75-13-17-БГ	K157	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	23,0 ЛМБГ	908	240	-60...+85
PK 75-13-17-Б	K158	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	27,4 ЛМБ	1129	240	-60...+85
PK 75-13-17-Ба	K159	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	27,4 ЛМБА	1129	240	-60...+85
PK 75-13-17-К	K160	1x2,05 М	13,0±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	34,9 ЛМК	2831	375	-60...+85
PK 75-13-32	K328	1x3,05 М	13,0±0,5 КШПП	0,4 0,1 М	17,8±0,5 ОАП	419	180	-60...+85
PKM 2,8/10	K328	1x3,05 М	12,2 КШПП	0,5 0,1 М	≤17,5 ОАП	384	100	-50...+60
PKMO 2,8/10	K329	1x3,05 М	12,2 КШПП	0,5 0,1 М	≤19 ОМОО	528	100	-50...+60
PK 75-17-17	K156	1x2,63 М	17,3±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	22,0±0,8 ОАП	645	120	-60...+85
PK 75-17-17-БГ	K157	1x2,63 М	17,3±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	27,5 ЛМБГ	1189	450	-60...+85
PK 75-17-17-Б	K158	1x2,63 М	17,3±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	31,9 ЛМБ	1448	450	-60...+85
PK 75-17-17-Ба	K159	1x2,63 М	17,3±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	31,9 ЛМБА	1448	450	-60...+85
PK 75-17-17-К	K160	1x2,63 М	17,3±0,4 ПЭ	0,4 0,1 М	39,4 ЛМК	3500	450	-60...+85
PK 75-17-31	K329	1x4,0 М	17,3±0,6 КШПП	0,4 0,1 М	22,3 ^{+0,5} _{-1,4} ОМОО	783	160	-60...+85
PKM 5/18	K329	1x5,0 М	19,5±1,0 КШПП	0,5 0,1 М	27,0±2,0 ОМОО	1087	140	-50...+70
PK 50-24-15	K147	1x6,7 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	27,6±1,1 СВ	2280	200	-60...+85
PK 50-24-15-Б	K148	1x6,7 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	38,0 МНБ	3660	270	-60...+85

Марка кабеля	Конструкция и материал изоляции термического проводника	Конструкция и материал изоляции термического проводника	Конструкция и материал внешней оболочки, защитные покровы	Наружный диаметр, мм	Масса, кг/км	$R_{нагр, min}$, мм	Рабочие температуры, °С
PK 50-24-15-ОП	K149 1×6,7 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	28,8±1,1 МНОБ	2700	200	-60...+85
PK 50-24-16	K150 37×1,0 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	27,6±1,1 СВ	2230	200	-60...+85
PK 75-24-15	K147 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	27,6±1,1 СВ	2080	270	-60...+85
PK 75-24-15-Б	K148 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	38,0 МНБ	3197	200	-60...+85
PK 75-24-15-ОП	K149 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	28,8±1,1 МНОБ	2307	200	-60...+85
PK 75-24-17	K156 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	29,3±1,1 ОАП	1055	150	-60...+85
PK 75-24-17-БГ	K157 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	34,8 ЛМБ Г	1756	560	-60...+85
PK 75-24-17-Б	K158 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	39,2 ЛМБ	2076	560	-60...+85
PK 75-24-17-Ба	K159 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	39,2 ЛМБ А	2076	560	-60...+85
PK 75-24-17-К	K160 1×3,6 М	24,0±0,7 ПЭ	0,4 0,1 М	46,7 ЛМК	4614	560	-60...+85
PK 50-33-15	K150 37×1,33 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	37,0±1,5 СВ	3616	260	-60...+85
PK 50-33-15-Б	K151 37×1,33 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	47,4 МНБ	5001	340	-60...+85
PK 50-33-15-ОП	K152 37×1,33 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	38,2±1,5 МНОБ	3903	260	-60...+85
PK 75-33-15	K147 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	37,0±1,5 СВ	3360	260	-60...+85
PK 75-33-15-Б	K148 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	47,4 МНБ	4745	340	-60...+85
PK 75-33-15-ОП	K149 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	38,2±1,5 МНОБ	3591	260	-60...+85
PK 75-33-17	K156 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	38,8±1,5 ОАП	1752	200	-60...+85
PK 75-33-17-БГ	K157 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	44,3 ЛМБ Г	2653	610	-60...+85
PK 75-33-17-Б	K158 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	48,7 ЛМБ	3018	610	-60...+85
PK 75-33-17-Ба	K159 1×5,0 М	33,0±0,8 ПЭ	0,4 0,1 М	48,7 ЛМБ А	3018	610	-60...+85
PK 50-44-15	K153 12,2 СКПМ	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	48,0±2,0 СВ	5304	340	-60...+85
PK 50-44-15-Б	K154 12,2 СКПМ	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	58,4 МНБ	7046	420	-60...+85
PK 50-44-15-ОП	K155 12,2 СКПМ	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	49,2±2,0 МНОБ	5685	340	-60...+85

РК 75-44-15	K147	1x6,6 М	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	48,0±2,0 СВ	4823	340	-60...+85
РК 75-44-15-Б	K148	1x6,6 М	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	58,4 МНБ	65,65	420	-60...+85
РК 75-44-15-ОП	K149	1x6,6 М	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	49,2±2,0 МНОБ	5203	340	-60...+85
РК 75-44-17	K156	1x6,6 М	44,0±1,0 ПЭ	0,4 0,1 М	50,8±2,0 ОАП	2760	250	-60...+85

П р и м е ч а н и е. Условные обозначения специфических исполнений оболочек и защитных покровов: СВ – оболочка из свинца, МНБ – оболочка из свинца, ленточная броня и защитные покровы по ГОСТ 7006-72; МНОБ – оболочка из свинца, поверх которой наложена оплётка из стальных оцинкованных проволок; ОАП – оболочка в виде обмотки лентами ПЭТФ (или прорезиненными) и трубки из СПЭ; ЛМБГ – оболочка типа ОАП, покрытия голой ленточной броней по ГОСТ 7006-72; ЛМБ – оболочка типа ОАП, покрытая ленточной броней и защитными покровами по ГОСТ 7006-72; ЛМБА – то же самое, что ЛМБ, но броня из стальной оцинкованной или предварительно покрытой битумным составом ленты; ЛМК – оболочка типа ОАП, броня из стальных оцинкованных круглых проволок, защитные покровы брони; ОМОО – оболочка в виде обмотки лентами ПК-4 (или ПЭТФ), трубки из СПЭ, обмотки из прорезиненной ленты и оплётки из стальных оцинкованных проволок.

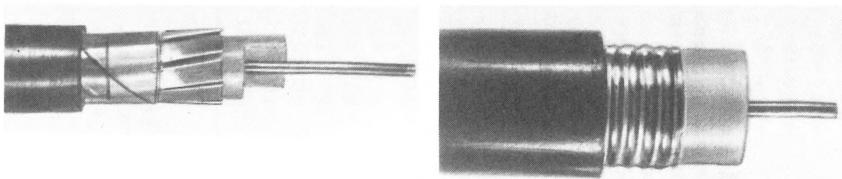


Рис. 7.5. Коаксиальный гибкий кабель РК 75-13-32 с полувоздушной изоляцией и внешним проводником в виде повива плоских проволок

Рис. 7.6. Коаксиальный полугибкий кабель РК 75-17-13-С со сплошной изоляцией и внешним проводником из продольно наложенной металлической фольги

метром по изоляции от 13 до 44 мм (рис. 7.5). Конструктивные параметры приведены в табл. 7.9, а электрические – в табл. 7.10.

По сравнению с гибкими оплеточными кабелями они характеризуются в три–пять раз меньшими потерями, так как исключено отрицательное влияние контактных сопротивлений (ср. табл. 7.2 и 7.10). Кабели нормируются по испытательному напряжению при двух частотах: 50 Гц и 1,76 МГц.

Внешний проводник кабелей этой группы выполняется в виде повива плоских медных проволок толщиной 0,4–0,5 мм, обмотанных одной или двумя медными лентами толщиной 0,1 мм. Указанный в таблице диапазон рабочих температур допустим при эксплуатации кабелей в фиксированном состоянии. При эксплуатации с изгибами минимально допустимая рабочая температура –15 или –30° С.

Оболочки и защитные покровы допускают эксплуатацию кабелей данной группы в самых тяжелых условиях, в том числе при подземной и подводной прокладке.

Полугибкие кабели с внешними проводниками из продольной ленты получили развитие в последние годы преимущественно в системах кабельного телевидения (рис. 7.6). Конструктивные их параметры приведены в табл. 7.11, а электрические – в табл. 7.12. Внешние проводники кабелей РК 75-3,7-31, РК 75-4-113, РК 75-11-11-С и РК 75-17-13-С выполнены из медной гофрированной (МГ) фольги толщиной 0,05 мм, наложенной продольно с перекрытием краев. Для увеличения живучести при сверхнормативных изгибах и перегибах в первых двух кабелях дополнительно положена медная дренажная проволока диаметром 0,3 мм. Кабели РК 50-4-16 и РК 75-4-115 имеют внешний проводник из дублированной алюмополимерной ленты. Дублированная лента имеет лавсановую (ПЭТФ) или капроновую основу, на которую с двух сторон наклеена алюминиевая фольга (А2П). Она обеспечивает высокую стойкость кабелей к перегибам и изгибам по малому радиусу. С целью уменьшения сопротивления внешнего проводника на постоянном токе и низ-

Таблица 7.10. Электрические параметры коаксиальных гибких радиочастотных кабелей с внешним проводником в виде повива плоских проволок

Марка кабеля	Волно- вое со- против- ление, Ом	$C, \text{ пФ/м}$	ξ	Номинальный коэффициент затухания при $T_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$ и номинальная мощность на входе при $T_{\text{окр}} = 40^\circ\text{C}$ и частотах			$U_{\text{исп}} \text{ при } 50 \text{ Гц, кВ}$	$U_{\text{кор}} \text{ кВ}$	$U_{\text{исп}} \text{ при } 1,76 \text{ МГц, кВ}$
				15 МГц	200 МГц	1000 МГц			
PK 50-13-15, Б, ОП	50±2	100	1,52	0,011/6,5	0,05/1,5	0,16/0,5	—	10	7
PK 75-13-15, Б, ОП	75±3	67	1,52	0,011/6,5	0,05/1,5	0,16/0,5	—	10	7
PK 75-13-17, БГ, Б, Ба, К75±3	67	1,52	0,011/5,5	0,05/1,3	0,16/0,45	—	10	7	7
PK 75-13-32	75±3	53	1,2	0,010/5,0	0,07/0,8	0,12/0,30	0,23/0,15	3	—
PKM 2,8/10	70±3,5	56	1,17	0,011/—	0,05/—	0,11/—	До 1,5 ГГц	2	—
PKMO 2,8/10	70±3,5	56	1,17	0,011/—	0,05/—	0,11/—	До 1,5 ГГц	2	—
PK 75-17-17, БГ, Б, Ба, К75±3	67	1,52	0,011/7	0,042/2,5	0,13/0,5	—	18	8	12
PK 75-17-31	75±3	54	1,21	0,06/9,0	0,03/2,6	0,07/0,9	—	4	—
PKM 5/18	70±3,5	58	1,22	0,007/—	0,035/—	0,08/—	—	4	—
PK 50-24-15, Б, ОП	50±2	100	1,52	0,008/12	0,035/2,8	0,11/0,8	—	25	14
PK 50-24-16	50±2	100	1,52	0,008/13	0,035/2,9	0,11/0,9	—	25	22
PK 75-24-15, Б, ОП	75±3	67	1,52	0,008/12	0,035/2,8	0,11/0,8	—	25	15
PK 75-24-17, БГ, Б, Ба, К75±3	67	1,52	0,008/12	0,035/2,8	0,11/0,8	—	25	13	15
PK 50-33-15, Б, ОП	50±2	100	1,52	0,006/20	0,03/4,5	0,10/1,0	—	25	20
PK 75-33-15, Б, ОП	75±3	67	1,52	0,006/20	0,03/4,5	0,10/1,0	—	25	22
PK 75-33-17, БГ, Б, Ба	75±3	67	1,52	0,006/20	0,03/4,5	0,10/1,0	—	25	17
PK 50-44-15, Б, ОП	50±2	100	1,52	0,0045/28	0,025/5,5	0,095/1,1	—	25	22
PK 75-44-15, Б, ОП	75±3	67	1,52	0,0045/28	0,025/5,5	0,095/1,1	—	25	22
PK 75-44-17	75±3	67	1,52	0,0045/28	0,025/5,5	0,095/1,1	—	25	25

Таблица 7.11. Конструктивные параметры коаксиальных полужестких радиочастотных кабелей с внешним проводником из продольно наложенной ленты

Марка кабеля	Конструкция и материал внутреннего проводника	Конструкция материала изоляции	Толщина и материал ленты, число, метр, мм; материал и материал оболочки изолента	Наружный диаметр и материал оболочки изолента	Масса, кг/км	$R_{изг}$ минимум, м	Рабочие температуры, °C
PK 75-3-7-31	K 702	1x0,9 М	3,7±0,15 ПЭП	0,05МГ/1x0,3 М	5,8±0,3 СПЭ	31	58 -50...+50
PK 50-4-6	K 703	1x1,32 М	4,6±0,2 ПЭ	0,05А2П/2x0,3МО	6,4±0,4 СПЭ	45	50 -60...+85
PK 75-4-113	K 700	1x0,8 М	4,6±0,2 ПЭ	0,05МГ/1x0,3 М	7,0±0,4 СПЭ	46	70 -50...+50
PK 75-4-115	K 703	1x0,71 М	4,6±0,15 ПЭ	0,05А2П/2x0,3МО	6,4±0,4 СПЭ	36	50 -60...+85
PK 75-11-11-C	K 701	1x1,88 М	11,5±0,15 ПЭ	0,16МГ/-	15,4±0,6 СПЭ	220	230 -60...+85
PK 75-17-13-C	K 701	1x2,73 М	17,3±0,20 ПЭ	0,16МГ/-	22,3±1,0 СПЭ	473	240 -60...+85

Таблица 7.12. Электрические параметры коаксиальных полужестких радиочастотных кабелей с внешним проводником из продольно наложенной ленты

Марка кабеля	Волновое сопротивление, Ом	C , пФ/м	ξ	Номинальный коэффициент затухания, дБ/М/номинальная мощность на входе Вт, при $T_{окр} = 40^{\circ}\text{C}$ и частотах			$U_{исп}$, кВ	$U_{кор}$, кВ	R_1 , Ом/км
				0,2 ГГц	1 ГГц	3 ГГц			
PK 75-3-7-31	75±3	55	1,22	0,11/-	0,26/-	—	—	0,8	27,2
PK 50-4-16	50±2	100	1,52	0,11/400	0,27/150	0,5/80	1,1/30	6	34,5
PK 75-4-113	75±3	67	1,5	0,11/-	0,26/-	—	—	5	12,7
PK 75-4-115	75±2,5	67	1,52	0,12/400	0,30/150	0,55/80	1,15/30	5	43,7
PK 75-11-11-C	75±2*	67	1,5	0,047/-	0,120/-	—	—	7	6,3
PK 75-17-13-C	75±2*	67	1,5	0,034/-	0,092/-	—	—	10	—

* Нормируется неравномерность волнового сопротивления, выраженного через КСВН в полосе частот 30–270 МГц.

ких частотах, а также для удобства монтажа прокладываются две дренажные проволоки.

Основные достоинства кабелей этой группы в том, что они по всем электрическим параметрам близки к полужестким кабелям и при этом отличаются наименьшей материалоемкостью и трудоемкостью. Следует полагать, что эти кабели полностью вытеснят гибкие оплеточные во всех случаях фиксированного монтажа.

7.2. ПОЛОСКОВЫЕ, СИММЕТРИЧНЫЕ И СПИРАЛЬНЫЕ РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

Полосковые радиочастотные кабели предназначены для передачи высокочастотной энергии в радиоаппаратуре в диапазоне частот 1,5–60 МГц (рис. 7.7).

Проводники полосковых кабелей представляют собой две медные ленты толщиной $0,150 \pm 0,005$ мм, расположенные продольно. Ширина проводников указана в табл. 7.13. Изоляция выполняется из фторопластовой пленки, расположенной между проводниками. Ширина пленки на 0,1 мм больше ширины медных лент, толщина указана в таблице. Поверх уложенных параллельно проводников и изоляции накладывается паяная изоляция методом обмотки из фторопластовой пленки с перекрытием. Оболочка выполняется из светостабилизированного полиэтилена.

Полосковые кабели могут эксплуатироваться в диапазоне температур $-60 \div +85^\circ\text{C}$. Допускают однократный изгиб по радиусу 3 мм, выдерживают десятикратные перегибы по радиусу 20 мм.

Основные электрические параметры кабелей приведены в той же таблице. Кроме того, нормируются: электрическое сопротивление изоляции, которое должно быть не менее 200 МОм·м, и испытательное напряжение частоты 1,76 МГц, которое равно 300 В.

Симметричные (двупроводные) радиочастотные кабели применяются в качестве линий задержки, например, в осциллографии; линий передачи в импульсных и высокочастотных цепях с симметричными относительно земли входами и выходами. Применяются кабели в различных высокочастотных СВЧ-устройствах, мостовых схемах, ответвителях, разветвителях, трансформаторах и др.

Промышленность выпускает симметричные радиочастотные кабели следующих трех конструктивных схем:

Рис. 7.7. Полосковый радиочастотный кабель РП 6-5-12



Таблица 7.13. Конструктивные и электрические параметры полосковых радиочастотных кабелей

Марка кабеля	Ширина проводников, мм	Толщина изоляции и дюллик, пуск, мм	Наружные размеры, мм		Масса, кг/км	Волновое сопротивление, Ом	$C, \text{пФ/м}$	$\alpha \text{ при } 30 \text{ МГц}, \text{дБ/м}$	$U_{\text{раб}} \text{ при } 1,76 \text{ МГц, В}$
			ширина	толщина					
РП 3-3-11	3,4	0,03±0,005	4,2	1,2±0,1	12,87	3,2	1530	2,2	18
РП 3-5-11	5,0	0,05±0,005	5,7	1,2±0,1	18,73	3,2	1530	1,1	25
РП 3-7-11	7,5	0,08±0,001	8,6	1,3±0,2	28,32	3,2	1530	0,5	25
РП 4-5-11	5,0	0,08±0,01	5,7	1,2±0,1	19,15	4,7	1190	0,6	35
РП 4-7-11	7,5	0,12±0,01	8,6	1,3±0,2	29,01	4,7	1190	0,3	50
РП 6-5-12	5,0	0,10±0,005	5,7	1,2±0,1	19,39	6,3	780	0,4	50
РП 6-7-11	7,5	0,17±0,01	8,6	1,5±0,2	29,89	6,3	780	0,25	68
РП 9-5-11	5,0	0,17±0,01	5,7	1,3±0,1	20,22	9,4	500	0,25	72
РП 9-7-11	7,5	0,25±0,01	8,6	1,6±0,2	31,30	9,4	500	0,20	100
РП 12-5-12	5,0	0,23±0,01	5,7	1,4±0,1	20,95	12,5	370	0,20	100
РП 18-5-11	5,0	0,37±0,01	5,7	1,7±0,2	22,64	18,8	240	0,15	145

Рис. 7.8. Симметричный (двуихпроводный) кабель РД 100-7-11 в общем экране



неэкранированные кабели;
кабели с проводниками в общем экране (рис. 7.8);
кабели двухкоаксиальные и в общем экране.

Кабели с полиэтиленовой изоляцией представлены группой среднегабаритных экранированных и двухкоаксиальных, а кабели с фторопластовой изоляцией – группой субминиатюрных и миниатюрных неэкранированных кабелей и в общем экране.

Сpirальныe радиочастотные кабели используются в основном в качестве линий задержки и согласующих устройств в диапазоне частот менее 200–250 МГц. Отличительной особенностью этих кабелей является внутренний проводник, выполненный в виде плотной изолированной проволочной спирали, наложенной на диэлектрический сердечник. За счет этого спиральные кабели обладают большой индуктивностью и малой скоростью распространения электромагнитной волны.

Выпускаются кабели коаксиальной и симметричной конструкции, симметричные кабели выполняются путем намотки встречных спиралей на общий сердечник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов И.Е., Останькович Г.А. Радиочастотные линии передачи: Радиочастотные кабели. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Связь, 1977. 408 с.
2. Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели, — 3-е изд., перераб. М.: Энергия, 1973. 328 с.
3. Краухрельд Л.И., Рязанов И.Б. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов. М.: Высшая школа, 1972. 384 с.
4. Киселев Д.С., Лебедев К.В. Применение радиочастотных кабелей и основные эксплуатационные требования // Радиоэлектроника. 1957. Вып. 8. С. 58–60.
5. Пименов В.М., Бранзбург Б.Я., Колесников В.А. Кабели для систем кабельного телевидения. М.: Связь, 1980. 52 с.
6. Блиндер Е.М., Фурман С.Л. Телевидение. М.: Радио и связь, 1984. — 272 с.
7. Чурин Ю.А. Переходные процессы в линиях связи быстродействующих схем ЭВМ. М.: Сов. радио, 1975. 208 с.
8. Чурин Ю.А. Проектирование длинных линий связи ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника. 1984. Вып. 7. С. 66–73.
9. Козма Р.Д. Перспективы широкого внедрения локальных сетей персональных компьютеров // Электроника. 1984. № 25. С. 4–6.
10. Ламан Н.К., Белоусова А.Н., Кречетникова Ю.И. Заводу "Электропровод" 200 лет. М.: Энергоатомиздат, 1985. 336 с.
11. Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели — М.–Л.: Госэнергогиздат, 1952. — 272 с.
12. Орлович Ф.М., Ефимов И.Е. Радиочастотные кабели и пути их унификации // Радиоэлектроника. 1957. Вып. 8. С. 22–27.
13. Дорезюк Н.И., Попов М.Ф. Радиочастотные кабели высокой регулярности. М.: Связь, 1979. 104 с.
14. Гальперович Д.Я. Сверхпроводящий миниатюрный коаксиальный кабель // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1970. Вып. 67. С. 6.
15. Гальперович Д.Я. Сверхпроводящие кабели связи. М.: Радио и связь, 1986. 80 с.
16. Хренков Н.Н., Гальперович Д.Я., Бранзбург Б.Я. Поколения радиочастотных кабелей // Тез. докл. 5-й Всесоюз. науч.-техн. конф. "Состояние и перспективы развития кабелей связи". М., 1976. С. 77–78.
17. Миниатюрные прецизионные полужесткие кабели для электроники СВЧ/ Н.Н. Хренков, А.В. Лобанов, Г.П. Щелкунов, Н.В. Нуждин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1983. Вып. 1 (349). С. 46–47.
18. Бранзбург Б.Я., Ионов А.Г., Хренков Н.Н. Эффективность и перспективы миниатюризации радиочастотных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1981. Вып. 8–9. С. 5–7.
19. Маковский В.А., Хренков Н.Н., Чернышев С.К. Основные принципы автоматизации проектирования радиочастотных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1981. Вып. 8(198), 9 (199). С. 2–5.
20. Патентоведение: Учебник для вузов / Е.И. Артемьев, М.М. Богуславский, Р.П. Вчерашний и др. / Под ред. В.А. Рясенцева. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 352 с.

21. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.
22. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. М.: Энергия, 1965. 352 с.
23. Павлов А.А., Дорезюк Н.И. Статистический метод оценки частотных характеристик отражения радиочастотных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1977. Вып. 11 (153). С. 1–4.
24. Рабинер Х., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 848 с.
25. Отнес Р., Энкокс Л. Прикладной анализ временных рядов: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 430 с.
26. Павлов А.А. Частотные и температурные характеристики затухания радиочастотных кабелей при криогенных температурах // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1978. Вып. 7 (161). С. 4–7.
27. Гарб Х.Л., Шмаков Ю.Г. Эффективные граничные условия для электромагнитного поля на поверхности металлического слоя // Радиотехника и электроника. 1976. № 4. С. 846–847.
28. Физика металлов: 1. Электроны Пер. с англ. / Под ред. Д. Займана. М.: Мир, 1972. 464 с.
29. Белоусов А.К., Савченко В.С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1975. 320 с.
30. Электрические контакты. – М.: Наука, 1973. – 208 с.
31. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей: Пер. с нем. М.: Изд-во Иностр. лит., 1961. 712 с.
32. Ганстон М.А. Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ: Пер. с англ. / Под ред. А.З. Фрадкина. М.: Связь, 1976. 152 с.
33. Ионов А.Г., Лаптев А.А., Чернышев С.К. Расчет параметров передачи коаксиальных кабелей с трубчатыми проводниками в широком диапазоне частот // Электричество. 1983. № 8. С. 71–74.
34. Дорезюк Н.И., Павлов А.А., Попов М.Ф. Расчет волнового сопротивления коаксиальных кабелей сложной конструкции // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1978. Вып. 7 (161). С. 7–10.
35. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. – Ч.3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия. 1969. 352 с.
36. Снижение коэффициента затухания коаксиальных кабелей при криогенном охлаждении / Д.Я. Гальперович, Т.В. Коржакова, А.А. Павлов. Н.Н. Хренков // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1975. Вып. 12 (130). С. 3–5.
37. Воздействие криогенных температур на коэффициент затухания гибких радиочастотных кабелей / Б.В. Мальков, А.А. Павлов, Д.Я. Гальперович, Н.Н. Хренков // Тр. ВНИИКП. 1981. Вып. 23. С. 39–47.
38. Лобанов А.В., Павлов А.А., Хренков Н.Н. Изменения электрических параметров радиочастотных кабелей при температурных воздействиях // Электротехника. 1984. № 9. С. 45–46.
39. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов / Под ред. В.А. Привезенцева. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 472 с.
40. Еильман Л.С. Проводниковые материалы в электротехнике. – М.: Энергия, 1974. 168 с.
41. Воронцова П.А., Маслов В.В., Пешков И.Б. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. М.: Энергия, 1971. 224 с.
42. Брискер А.С., Руга А.Д., Шарле Д.Л. Городские телефонные кабели: Справодчик / Под ред. Д.Л. Шарле – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1984. 304 с.

43. Мастеров В.А., Саксонов Ю.В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе: Справочник. М.: Металлургия, 1979. 296 с.
44. Иноzemцев В.Г. Аэродинамический протир для формования толщины покрытия при горячем лужении проволоки // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1975. Вып. 2 (120). С. 6–9.
45. Белый Д.И., Свалов Г.Г. Сверхпроводящие и криорезистивные провода для криогенной техники: Обзорная информация. Сер. Кабельная техника. М.: Информэлектро, 1977. 68 с.
46. Pawlek F., Rogalla D. The electrical resistivity of silver, copper, aluminium and zinc as a function of purity in range 4–298K // Cryogenics. 1966. Vol. 6. № 1. P. 14–20.
47. Лифанов И.И., Шерстюков Н.Г. Тепловое расширение меди в интервале $185\text{--}300^{\circ}\text{C}$ // Измерительная техника. 1968. № 12. С. 39.
48. Тареев Б.М., Филимонов Ю.Л. Свойства электротехнических материалов при криогенных температурах: Учебное пособие. М.: МИРЭА, 1972. 66 с.
49. Фторопласти: Каталог. Черкассы: НИИТЭХИМ, 1983.
50. Дикерман Д.Н., Кунегин В.С. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией. М.: Энергоиздат, 1982. 144 с.
51. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласти. Л.: Химия, 1978. – 229 с.
52. Фторополимеры / Под ред. Л.А. Уолла: Пер. с англ. / Под ред. И.Л. Кнунианца и В.А. Пономаренко. М.: Мир, 1975. 448 с.
53. Лобанов А.В., Павлов А.А., Хренков Н.Н. Механические напряжения в радиочастотных кабелях при температурных воздействиях // Электротехника. 1983. № 10. С. 11–14.
54. Электрические свойства полимеров / Б.И. Сажин, А.М. Лобанов, О.С. Романовская и др. / Под ред. Б.И. Сажина. – 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1986. 224 с.
55. Койков С.Н. Физика диэлектриков. – Ч.1. Поляризация и диэлектрические потери: Конспект лекций / Под ред. Е.В. Кувшинского Л.: Ленингр. политехн. институт, 1974. 164 с.
56. Koizumi N., Yano S. Three terminal dielectric cell for solids // Bull. inst. chem. res. Kioto univ. 1969. Vol. 47. № 4. P. 320–326.
57. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела: Пер. с англ. / Под ред. С.В. Тяблникова 2-е изд. М.: Мир, 1969. 560 с.
58. Sasabe H., Saito S. Effects of temperature and pressure on the dielectric constant in non-polar polymers // Polym. J. 1972. VoL. 3. № 6. P. 749–755.
59. Reed R.P., Schramm R.E., Clark A.F. Mechanical, thermal and electrical properties of selected polymers // Cryogenics. – 1973. Vol. 13. № 2. P. 67–82.
60. Chant M.J. Dielectric properties of some insulating materials over the temperature range 4.2–300 K // Cryogenics. – 1967. Vol. 7. № 6. P. 351–354.
61. Исследование диэлектрических свойств неполярных полимеров в диапазоне частот 16–38 ГГц и интервале температур 4,2–300 K / В.В. Костромин, Е.Б. Быков, Д.Я. Гальперович и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1984. Вып. 4 (364). С. 52–55.
62. PTFE + FEP in electronics: Electronic testing and data techniques / The international Pampus organisation. P. 42/71.
63. Хренков Н.Н. Свойства фторполимеров при криогенных температурах: Обзорная информация. Сер. Кабельная техника. М.: Информэлектро, 1973. 44 с.
64. Электрические свойства сополимера тетрафторэтилен + этилен / А.М. Лобанов, М.П. Эйдельштант, Б.И. Сажин и др. // Пластические массы. 1978. № 12. С. 19–21.
65. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение: Пер. с англ. / Под ред. Д.М. Ка зарновского М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959. 336 с.
66. Перепечко И.И. Свойства полимеров при низких температурах. М.: Химия, 1977. 272 с.
67. Хренков Н.Н., Чернышев С.К. Построение, обработка и анализ температурно-

- частотных зависимостей потерь высокочастотных диэлектриков // Электричество. 1980. № 3. С. 56–59.
68. Егоров В.Н., Костромин В.В. Методика измерения $\tg\delta$ полимеров в миллиметровом диапазоне волн при температуре 4,2–350 К // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 10. С. 34–37.
69. Производство кабелей и проводов: Учебник для техникумов / Н.И. Белоруссов, Р.М. Лакерник, Э.Т. Ларина и др. / Под ред. Н.И. Белоруссова и И.Б. Пешкова. М.: Энергоиздат, 1981. 632 с.
70. Хренков Н.Н. Классификация и взаимосвязь процессов производства длинномерных кабельных изделий // Вопросы расчета, конструирования, производства и испытаний кабельных изделий. Сб. науч. тр. ВНИИКП. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 56–65.
71. Павлов А.А., Румянцев Д.Д. Исследование распределения технологических длин кабельных изделий // Теория, расчет, конструкции, характеристики и технология производства кабельных изделий. Сб. науч. тр. М.: Энергоиздат, 1982. С. 86–98.
72. Теория надежности и массового обслуживания / Под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Наука, 1969. 303 с.
73. Гмурман В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1977. 479 с.
74. Лебедев В.Д. Теория скрутки электрических кабелей. М.–Л.: Энергоиздат, 1932. 64 с.
75. Бикбаев Р.С. Расчет на прочность при растяжении элементов многопроволочных жил и многожильных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1974. Вып. 7 (113). С. 5–8.
76. Бабицкий О.Ш., Лехтман Л.Я. Технология скрутки кабелей: Крутильное оборудование кабельного производства. М.: Энергия, 1978. – 136 с.
77. Кожевников Б.А. Оплетка кабельных изделий. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 112 с.
78. Парнина Э.Т., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Расчет технологических режимов и проектирование оборудования для производства кабелей и проводов. Ч. 1 / Под ред. В.А. Привезенцева. М.: Изд-во МЭИ, 1976. 90 с.
79. Чернышев С.К., Хренков Н.Н. Выбор оптимальных режимов спиральной обмотки лентами методом параметрических ограничений // Электротехника. 1983. № 10. С. 23–26.
80. Абубакиров Б.А., Гудков К.Г., Нечаев Э.В. Измерение параметров радиотехнических цепей. М.: Радио и связь. 1984. – 248 с.
81. Сушкевич В.И. Нерегулярные линейные волноводные системы. М.: Сов. радио, 1967. 296 с.
82. Рассел. Затухание на радиочастотах // ТИИЭР. 1967. Т. 55. № 6. С. 230–249.
83. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 360 с.
84. Силаев М.А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. М.: Сов. радио. 1970. 240 с.
85. Адам С.Ф. Автоматические измерения в СВЧ-цепях // ТИИЭР. – 1978. Т. 66. № 4. С. 20–28.
86. Сверхпроводящие модернизированные кабели с ниобиевыми проводниками / Д.Я. Галыпович, С.А. Ганин, В.И. Гречков, Т.В. Коржакова, А.А. Лаптев // Электросвязь – 1987. № 10. С. 32–36.
87. Радиоизмерительные приборы. Каталог. "Изделия промышленности средств связи". 25-е изд., испр. и доп. – М.: ЭКОС, 1988. – 208 с.
88. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977. 608 с.
89. Воронцов А.С., Фролов П.А. Импульсные измерения коаксиальных кабелей связи. М.: Радио и связь, 1985. 96 с.
90. Савченко В.С., Мельников А.В., Карнишин В.И. Соединители радиочастотные коаксиальные. М.: Сов. радио, 1977. 48 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
<i>Глава 1. Назначение, развитие, основы классификации и маркообразование радиочастотных кабелей</i>	5
1.1. Области и условия применения	5
1.2. Краткая история развития радиочастотных кабелей в СССР	7
1.3. Основы классификации и кодирования	11
1.4. Классификация и кодирование конструкций	17
1.5. Системы стандартизации и документации на радиочастотные кабели	22
1.6. Системы маркообразования радиочастотных кабелей	27
<i>Глава 2. Процесс разработки и процедуры конструирования радиочастотных кабелей</i>	29
2.1. Процесс разработки и типовой цикл конструирования радиочастотного кабеля	29
2.2. Параметры радиочастотных кабелей	32
2.3. Процедуры конструирования радиочастотного кабеля	35
<i>Глава 3. Теория и расчет электрических параметров радиочастотных кабелей</i>	41
3.1. Основные уравнения передачи кабельной линии	41
3.2. Уравнения передачи нерегулярной кабельной линии	49
3.3. Линия передачи с периодическими нерегулярностями	52
3.4. Линия передачи со случайными нерегулярностями	57
3.5. Расчет характеристик нерегулярной линии методом быстрого преобразования Фурье	63
3.6. Электромагнитное поле коаксиального кабеля	69
3.7. Электромагнитное поле симметричных кабелей	74
3.8. Высокочастотное сопротивление сплошных и многослойных проводников	80
3.9. Высокочастотное сопротивление многопроволочных проводников	87
3.10. Расчет параметров коаксиальных радиочастотных кабелей	94
<i>Глава 4. Свойства материалов</i>	119
4.1. Свойства проводниковых материалов	119
4.2. Краткая характеристика материалов для изоляции и оболочек	127
4.3. Электрические свойства изоляционных материалов	133
<i>Глава 5. Расчет технологических режимов</i>	147
5.1. Классификация и характеристика технологических процессов	147
5.2. Моделирование непрерывности технологических процессов и расчет технологических длин кабелей	153
5.3. Расчет режимов изготовления внутренних и внешних проводников	161
5.4. Расчет режимов обмотки	172
<i>Глава 6. Измерение параметров радиочастотных кабелей</i>	180
6.1. Общая характеристика измерений и испытаний	180
6.2. Радиочастотный кабель в измерительном тракте	182
6.3. Методики нахождения собственного затухания	189
6.4. Измерение коэффициента затухания	194
6.5. Импульсная рефлектометрия по длине	202
6.6. Радиочастотные коаксиальные соединители	209
<i>Глава 7. Конструкции и характеристики радиочастотных кабелей</i>	217
7.1. Коаксиальные радиочастотные кабели	217
7.2. Полосковые, симметричные и спиральные радиочастотные кабели	249
Список литературы	252

