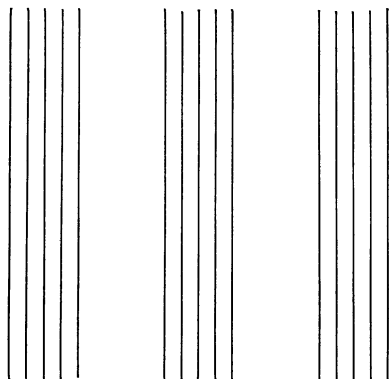


III

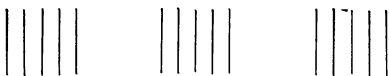
МОНТАЖНЫЕ ПРОВОДА

# МОНТАЖНЫЕ ПРОВОДА для радиоэлектронной аппаратуры



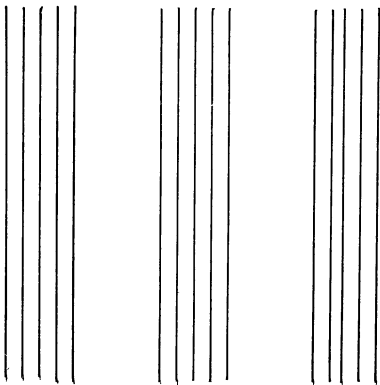


# МОНТАЖНЫЕ ПРОВОДА для радиоэлектронной аппаратуры



Под редакцией Л. И. КРАНИХФЕЛЬДА

Издание второе,  
переработанное и дополненное



Scan AAW



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1973

6П2.1.06

М 77

УДК 621.315.3:621.396.6

Авторы: А. Л. ГОЛЬДБЕРГ, В. П. ИНОЗЕМЦЕВ,  
Л. И. КРАНИХФЕЛЬД, В. А. МАКОВСКИЙ, Т. М. ОРЛОВИЧ

**Монтажные** провода для радиоэлектронной  
М 77 аппаратуры. Под ред. Л. И. Кранихфельда. Изд.  
2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1973.

296 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: А. Л. Гольдберг, В. П. Иноземцев,  
Л. И. Кранихфельд, В. А. Маковский, Т. М. Орлович

Книга посвящена вопросам конструирования, исследования и производства монтажных проводов для радиоэлектронной аппаратуры. В ней дана классификация монтажных проводов низкого напряжения, рассмотрены основные технические параметры этих проводов и методы испытаний; проанализированы элементы конструкций проводов и применяемые материалы; приведена типовая номенклатура современных монтажных проводов и их характеристики; описаны основные технологические процессы изготовления проводов и методы контроля их качества.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, может быть также полезна студентам вузов, специализирующимся в области кабельной техники.

М 3310-230  
051(01)-73 125-73

6П2.1.06

© Издательство «Энергия», 1973 г.

*Арон Лейбович Гольдберг, Валентин Петрович Иноземцев,  
Лев Исидорович Кранихфельд, Владимир Александрович Маковский,  
Теодор Максович Орлович*

**Монтажные провода для радиоэлектронной аппаратуры**

Редактор Д. Н. Дикерман

Редактор издательства М. П. Соколова

Переплет художника П. П. Первалова

Технический редактор Л. Н. Никитина

Корректор И. А. Володяева

---

Сдано в набор 12/1 1973 г.	Подписано к печати 16/XI 1973 г.	Т-17647
Формат 84×108 <sup>1/32</sup>	Бумага типографская № 3	Усл. печ. л. 15,54
Уч.-изд. л. 16,34	Тираж 10 000 экз.	Зак. 27
		Цена 97 коп.

---

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

---

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивное развитие радиоэлектроники и приборостроения резко повысило потребность в проводах, предназначенных специально для монтажа радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Одновременно определились и основные технические требования к монтажным проводам: высокие электрические характеристики при минимальных габаритах и массах, гибкость в широком интервале температур, повышенная эксплуатационная надежность и т. д.

Внедрение в кабельное производство новых полимерных материалов и создание высокопроизводительного технологического оборудования для переработки пластмасс обеспечило возможность массового выпуска таких проводов. В результате в последние годы монтажные провода выделились в самостоятельную группу кабельных изделий.

Широкое развитие производства монтажных проводов и непрерывное ужесточение требований, предъявляемых к ним современной техникой, вызвали необходимость проведения многочисленных исследований, направленных на разработку оптимальных конструкций проводов, высокопроизводительной технологии, обеспечивающей стабильность основных характеристик, и методов испытаний, максимально приближенных к условиям эксплуатации. По мере увеличения номенклатуры монтажных проводов и количества применяемых материалов возникла проблема типизации этой группы кабельных изделий путем разработки общих требований, системы классификации и создания типовой номенклатуры. Поэтому в первом издании этой книги, выпущенной в 1966 г., были собраны и обобщены результаты ряда работ отечественных и зарубежных исследователей в области монтажных проводов. При этом авторы стремились ознакомить читателей с максимальным количеством экспериментальных дан-



ных, полагая, что ввиду их новизны последние могут быть использованы как справочные материалы.

В настоящем, втором, переработанном и дополненном издании книги авторы помимо материала, имевшегося в первом издании, приводят новые сведения о монтажных проводах, являющиеся как результатом их собственных исследований и разработок, так и обобщением основных работ отечественных и зарубежных авторов, опубликованных в последние годы. Так, углублены и расширены материалы по электрической прочности и помехозащищенности монтажных проводов, введены новые главы, посвященные радиационной и химической стойкости, допустимым токовым нагрузкам, а также надежности, долговечности и сохранности этих проводов. Отличительной особенностью этого издания является то, что большинство теоретического материала базируется на математическом аппарате теории вероятности и математической статистики. Кроме того, второе издание книги снабжено приложениями, в которых приводится типовая номенклатура современных монтажных проводов, выпускаемых отечественной кабельной промышленностью, и даются их основные характеристики.

Существенно изменилось и построение книги. Так, в первой ее части рассмотрены общие вопросы, связанные с классификацией технических характеристик монтажных проводов и методов их испытаний, а также подробно излагаются способы оценки электрических, механических, климатических и других параметров. Вторая часть книги посвящена принципам конструирования монтажных проводов. В ней приведены рекомендации по выбору проводниковых, изоляционных и защитных материалов и оптимальных конструкций этих проводов, а также рассмотрены вопросы, связанные с технологией их изготовления.

Авторы надеются, что их работа будет полезна инженерно-техническим работникам как кабельной промышленности, так и промышленности, потребляющей монтажные провода.

Авторы приносят искреннюю благодарность Е. И. Мионову и П. А. Дмитриевскому, написавшим гл. 5, а также Б. С. Голованеву за ряд ценных замечаний по рукописи книги и Д. Н. Дикерману за большую работу, сделанную по редактированию рукописи.

*Авторы*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ**

---

### **Глава первая**

#### **КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ И СПОСОБЫ ИХ ОЦЕНКИ**

##### **1-1. Классификация технических характеристик**

В зависимости от назначения и особенностей эксплуатации к монтажным проводам, как и к другим кабельным изделиям, предъявляются определенные требования, все многообразие которых можно свести к следующим основным категориям: требования к конструктивным размерам и массам, требования к электрическим, механическим, климатическим и химическим характеристикам, требования по сохраняемости, долговечности и надежности.

Практически конструирование монтажных проводов заключается в удовлетворении указанных требований путем создания проводов с заданными значениями конструктивных, электрических, механических и других характеристик. При этом требования к конструктивным и электрическим характеристикам определяют назначение монтажных проводов, а остальные требования определяют область применения, т. е. допустимые условия монтажа и эксплуатации с точки зрения возможных механических, климатических и химических воздействий.

Величины же надежности, долговечности и сохраняемости определяют гарантии разработчика и завода-изготовителя по сохранению работоспособности проводов в заданных условиях хранения и эксплуатации. Общая классификационная схема технических характеристик монтажных проводов приведена в табл. 1-1.

Следует подчеркнуть, что работоспособность монтажных проводов, т. е. их способность выполнять свои функции в составе различной аппаратуры, целиком опреде-

Таблица 1-1

Категория характеристики	Вид характеристик
Конструктивные	Сечение жилы Число и диаметр проволок, входящих в токопроводящую жилу, система скрутки Шаг скрутки жилы Диаметр жилы Толщина изоляции Равноценность изоляции Шаг и плотность оплетки (для экранов) Наружный диаметр провода Масса провода
Электрические	Рабочее напряжение Электрическое сопротивление токопроводящей жилы Сопротивление изоляции Степень помехозащищенности Допустимые токовые нагрузки
Механические	Разрывная прочность Стойкость к продавливанию Стойкость к перегибам Гибкость Стойкость к истиранию Стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам
Климатические	Нагревостойкость Хладостойкость Стойкость к циклическому воздействию температур Влагостойкость Стойкость к тропическим воздействиям
Специальные	Стойкость к агрессивным средам Негорючесть Усадка изоляции Радиационная стойкость
Гарантийные	Сохраняемость Долговечность Надежность

ляется величинами электрических параметров. Потеря работоспособности проводов происходит при электрическом пробое изоляции, обрыве токопроводящих жил и выходе величин сопротивления изоляции и жилы за допустимые пределы. Поэтому при оценке механических, климатических и химических характеристик проводов, а также при определении их сохраняемости, долговечности и надежности в качестве критериев выбираются величины указанных электрических параметров.

## **1-2. Виды испытаний**

Разнообразие требований, предъявляемых к современным монтажным проводам, приводит к большому объему контролируемых параметров. Оценка (контроль) технических параметров монтажных проводов осуществляется путем проведения соответствующих испытаний.

В процессе хранения, монтажа и эксплуатации аппаратуры провода подвергаются воздействию различных механических, климатических и химических факторов. Каждое из этих воздействий в той или иной степени снижает исходные характеристики провода. В связи с этим основной задачей испытаний монтажных проводов является определение исходных электрических параметров, а также оценка изменения этих параметров при воздействии указанных выше факторов.

Испытания монтажных проводов проводятся как в процессе их изготовления (операционный контроль), так и после завершения технологического цикла (испытание готовой продукции). Кроме того, во многих случаях эти провода подвергаются испытаниям у потребителя (входной контроль, регламентные проверки и т. д.).

При операционном контроле в основном проверяются конструктивные размеры элементов провода, а также электрическая прочность изоляции.

Готовая продукция испытывается в полном объеме, предусмотренном табл. 1-1.

Однако при этом необходимо иметь в виду следующее. Поскольку длительные испытания проводов в условиях, близких к эксплуатационным, связаны с применением сложной аппаратуры и большими трудовыми затратами, такие испытания, если это возможно, следует проводить весьма редко. При серийном же производстве проводов объем испытаний должен быть сведен к тому

минимуму, который обеспечивает сохранение основных характеристик на уровне, достигнутом при разработке. В связи с этим все испытания готовой продукции можно разделить на следующие категории: типовые (конструкторские), приемосдаточные и контрольно-выборочные испытания.

Типовые испытания, выполняемые в полном объеме требований, предъявляемых к проводу, проводятся в период разработки провода на стадии изготовления опытных партий. При этом устанавливается гарантийный уровень всех технических характеристик провода, величины которых вносятся в технические условия. Второй раз конструкторские испытания проводятся при внедрении разработанного провода в серийное производство. И, наконец, эти испытания должны проводиться каждый раз при изменении применяемых материалов или технологических процессов.

Отдельные характеристики провода, величины которых могут изменяться при возможных в условиях производства отклонениях от нормального технологического процесса, контролируются при приемосдаточных испытаниях, которые в свою очередь подразделяются на сплошные, выборочные и периодические.

Сплошные испытания проводятся по тем характеристикам, которые являются наиболее изменчивыми при любых, даже незначительных, отклонениях от установленных технологических режимов. Применительно к монтажным проводам к таким испытаниям относятся испытание высоким напряжением и контроль конструктивных размеров. Естественно, что такие испытания проводятся на всех строительных длинах провода, т. е. на каждой бухте или катушке с проводом.

При выборочных приемосдаточных испытаниях контролируются более устойчивые к возможным технологическим отклонениям характеристики такие, как сопротивление изоляции и токопроводящих жил, разрывная прочность и т. д. Эти испытания проводятся не на всех строительных длинах, а выборочно на образцах, отобранных из 2 или 5% бухт проводов, предъявляемых к сдаче.

Периодические испытания проводятся обычно один раз в полугодие. При этом контролируются характеристики, величины которых практически весьма мало изменяются при колебаниях технологических режимов. К таким характеристикам относятся стойкость к переги-



Т а б л и ц а 1-2

Вид испытаний	Категория испытаний	Контролируемые характеристики	Периодичность испытаний
Операционный контроль	—	Электрическая прочность изоляции Конструктивные размеры элементов про- вода Режим скрутки, обмотки и оплетки	100%
Испытания готовой продукции	Типовые испытания	Все виды конструктивных, электрических, механических, климатических, химических и гарантийных характеристик, предусмотренных табл. 1-1	При разработке провода; при внедрении в серийное производство; при изменении применяемых материалов или технологических процессов
	Приемо-сдаточные испытания	Испытание высоким напряжением Конструктивные размеры элементов про- вода Линейная усадка изоляции	100% бухт сдаваемой партии
	Выборочные	Сопротивление изоляции Сопротивление токопроводящих жил Масса провода Разрывная прочность	2—5% бухт сдаваемой партии
	Периодические	Стойкость к продавливанию Стойкость к перегибам Хладостойкость Стойкость к циклическому воздействию температур Влагостойкость Стойкость к агрессивным средам	1 раз в полугодие
	Контрольно-выборочные испытания	По выбору представителя заказчика	—

бам, хладостойкость, влагостойкость и некоторые другие.

И, наконец, целью контрольно-выборочных испытаний является проверка качества изготовления монтажных проводов основным заказчиком. Как правило, такие испытания проводятся весьма редко, только при возникновении серьезных конфликтов между изготовителем и потребителем. Объем контрольных испытаний определяется заказчиком и может включать в себя контроль любых характеристик, регламентированных техническими условиями на данную марку провода.

Общая классификационная схема испытаний монтажных проводов приведена в табл. 1-2.

### **1-3. Элементы оптимального планирования испытаний**

Уменьшение толщины изоляции монтажных проводов и ужесточение общих требований, предъявляемых к ним современной техникой, требует разработки новых методов испытаний, максимально приближенных к условиям эксплуатации и обеспечивающих наиболее достоверные выводы.

Проблема оптимального планирования эксперимента включает два основных вопроса: выбор оптимальных условий проведения испытаний и расчет оптимального объема выборки (количества образцов).

#### *Выбор оптимальных условий проведения испытаний*

Результаты измерения величин электрических, механических и климатических характеристик существенно зависят от условий проведения эксперимента, т. е. от выбранного метода испытаний.

Разумеется, условия проведения эксперимента должны максимально приближаться к реальным условиям эксплуатации проводов. Если это осуществимо, то режимы испытаний, т. е. величины влияющих факторов, задаются заказчиком. Так, например, задаются радиусы, углы и частота изгибов проводов при испытании их на стойкость к многократным перегибам, величины грузов при испытании проводов на стойкость к продавливанию, концентрация химических реагентов при испытании проводов на химостойкость и т. д.

Однако в ряде случаев при оценке характеристики величины влияющих факторов заранее не известны (например, величины грузов при испытании проводов на

стойкость к истиранию и перегибам, скорость подъема нагрузки при испытании проводов на разрывную прочность и т. д.).

При разработке таких методов испытаний весьма важным является установление зависимости измеряемых величин от тех или иных влияющих факторов и выбор такого режима испытаний, при котором выводы получаются с наибольшей достоверностью.

Как известно, повторение эксперимента при одних и тех же, насколько это возможно, условиях дает разные результаты, т. е. единичное наблюдение не может быть точно воспроизведено, хотя опыт показывает, что система наблюдений, получающаяся при повторении процесса, обладает некоторыми общими характеристическими свойствами.

Для выбора эффективных оценок результатов эксперимента обычно пользуются основными положениями теории вероятностей и математической статистики [Л. 10, 47, 51]. Одной из практических задач математической статистики является нахождение такого описания на-

блюдаемых данных, при котором исследуемое явление может быть охарактеризовано с помощью наименьшего числа параметров. Основой для решения этой задачи является определение эмпирических распределений и математического выражения этих распределений и связанных с ним постоянных величин. На основании наблюдаемых данных определяются параметры этих распределений так, чтобы вся существенная информация, получаемая от наблюдений, была заключена в этих параметрах и в форме распределения. Наиболее часто встречающимся на практике распределением случайной величины является нормальное распределение, плотность которого определяется формулой

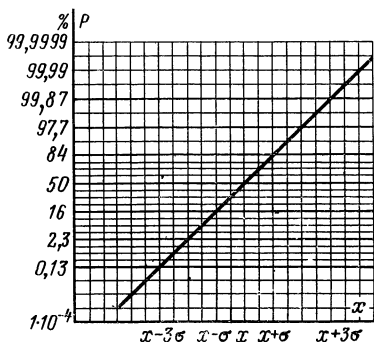


Рис. 1-1. Функция нормального распределения на вероятностной бумаге.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < +\infty). \quad (1-1)$$

Это распределение полностью определяется значениями лишь двух параметров  $a$  и  $\sigma$ , где  $a$  — математическое ожидание случайной величины, распределенной по нормальному закону, а  $\sigma^2$  — ее дисперсия.

Статистические оценки параметров нормального распределения задаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{a} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i; \\ \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2}{N-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

Удобным приемом для оценки параметров нормального распределения, редко используемым в отечественной практике, является построение полигона накопленных частот (или функции распределения) на так называемой вероятностной бумаге [Л. 47] (рис. 1-1).

Вероятностный масштаб оси ординат на вероятностной бумаге позволяет сразу оценивать значение 50% квантили распределения (среднее значение параметра) и стандартного отклонения ( $x_{50} - x_{16}$ ).

Построение полигона накопленных частот на вероятностной бумаге, кроме того, дает возможность оперативно оценивать вид распределения случайной величины. Так, аппроксимация совокупности получаемых точек на вероятностной бумаге прямой дает основание принять гипотезу о нормальном законе распределения случайной величины и наоборот, криволинейный характер этой со-

вокупности противоречит гипотезе о нормальном законе распределения.

Как показывает практика, распределение значений большинства параметров монтажных проводов близко к нормальному. Но в определенных случаях эти распределения могут быть и асимметричными. Это можно объ-

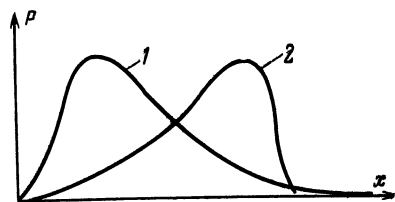
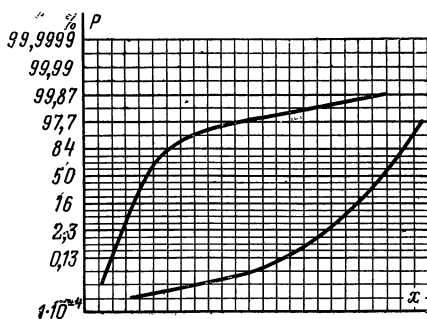


Рис. 1-2. Плотности асимметричных распределений.

1 — нормально-логарифмическое распределение, 2 — распределение, обратное нормально-логарифмическому.

яснить следующим. Пусть случайная величина представляет собой некоторую характеристику изделия, которое в процессе изготовления проходит достаточно много стадий обработки. Каждая стадия обработки вносит свои факторы, влияющие на отклонение измеряемой характеристики от номинального значения. Если все стадии, за исключением, например, одной, таковы, что приводят к отклонениям измеряемой характеристики одного порядка, а одна стадия дает отклонения существенно другого порядка, то в этом случае распределение будет асимметричным (рис. 1-2, кривая 1). Асимметричность такого вида обычно вызвана технологическими причинами и применительно к нашему случаю может быть на-

Рис. 1-3. Функция нормально-логарифмического и обратного ему распределений на вероятностной бумаге.



звана технологической асимметричностью. Причины асимметричности распределения случайной величины, изображенной на рис. 1-2, кривая 2, также иногда встречающегося на практике, совсем другого порядка. Характер асимметрии кривой плотности распределения обуславливается в данном случае наличием на изоляции провода случайных повреждений, не свойственных принятому технологическому процессу (например, случайные порезы, проколы или смятие изоляции после процесса изолирования при перемотке, транспортировании или испытании провода), т. е. причины такого рода асимметрии следует искать в области организации производства.

Оперативное выявление асимметричных распределений, отличающихся от нормальных, лучше всего производить с помощью вероятностной бумаги. На рис. 1-3 показан вид рассмотренных асимметричных распределений на вероятностной бумаге.



Необходимо отметить, что весьма часто асимметричные распределения можно изучать с помощью нормального. Это имеет место тогда, когда возможно найти такое преобразование независимой переменной, после которого на вероятностной бумаге график становится прямолинейным. В случае, когда спрямление производится преобразованием вида

$$u = a \ln x + b, \quad (1-3)$$

говорят, что распределение является нормально-логарифмическим.

На практике преобразование нормально-логарифмического распределения в нормальное производится с помощью функции

$$y = \lg x \quad (1-4)$$

или с помощью логарифмической вероятностной бумаги (рис. 1-4).

Таким образом, если распределение случайной величины подчиняется нормальному или нормально-логариф-

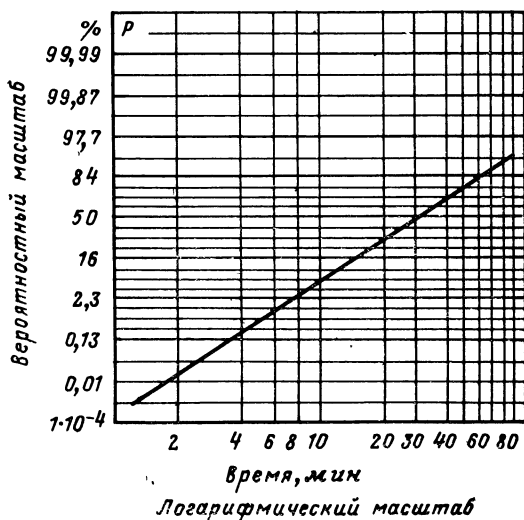


Рис. 1-4. Функция нормально-логарифмического распределения на вероятностной бумаге.

мическому законам, то, получив исходные данные, сравнительно несложно оценить среднее значение и степень разброса случайной величины вокруг среднего значения (математического ожидания). Количественным показателем степени разброса наблюдаемых данных, кроме не-

посредственного значения дисперсии, может также служить коэффициент вариации

$$c = \sigma / \bar{a}. \quad (1-5)$$

Чем меньше значение коэффициента вариации, тем меньше степень разброса случайной величины, тем однороднее исследуемое явление.

При выборе оптимальных режимов испытаний необходимо экспериментально получить зависимость величины коэффициента вариации  $c_i$  от величины влияющего фактора  $x_i$ :

$$c_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{\bar{a}_i} = f(x_i). \quad (1-6)$$

Очень часто эта зависимость имеет вид, изображенный на рис. 1-5. Оптимальные условия проведения эксперимента с точки зрения стабильности результатов будут при  $x_i$ , величина которого соответствует минимальному значению коэффициента вариации  $c_{\min}$ .

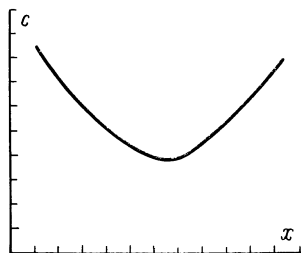


Рис. 1-5. Типичная зависимость  $C_i = f(x_i)$ .

### Расчет оптимального объема выборки

Достоверность каждого вида испытаний, т. е. вероятность того, что оценка величины того или иного параметра произведена корректно, зависит не только от повторяемости (стабильности) значений контролируемого параметра, но и от объема выборки, принятого для данного испытания.

Ниже рассматривается вопрос об определении оптимального объема выборки для проведения испытаний, гарантирующего заданный уровень достоверности.

Как уже говорилось, распределения значений большинства характеристик монтажных проводов близки к нормальному закону. При достаточно большом числе испытаний ( $N \geq 100$ ) статистические оценки параметров нормального распределения мало чем отличаются от их теоретических (истинных) значений. Поэтому в период разработки проводов, когда исследования каждого параметра проводятся в достаточно большом объеме, зада-

ваясь определенной вероятностью эффективного вывода (надежностью оценки)  $P$ , можно гарантировать уровень любого параметра по формуле

$$\Pi = \bar{a} \pm t_p \bar{\sigma}, \quad (1-7)$$

где  $\bar{a}$  и  $\bar{\sigma}$  — статистические оценки распределения;  $t_p$  — квантиль нормального распределения при фиксированном  $P$ .

Однако на практике гарантийный уровень технических параметров проводов устанавливается более широким, чем это предусмотрено формулой (1-7). Именно это обстоятельство и позволяет для серийных испытаний значительно уменьшить объем выборки.

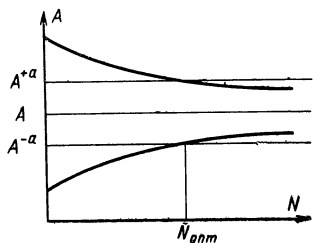


Рис. 1-6. К выбору доверительного интервала.

Итак, сформулируем задачу: в стандарте или технических условиях на монтажный провод величина некоторого параметра  $A$  ограничена диапазоном  $A \pm a$ . По заданным величинам надежности оценки

$P$  и достоверности  $\alpha$  требуется определить минимальное количество измерений этого параметра, гарантирующих достоверность оценки.

Пусть произведено  $N$  независимых опытов над случайной величиной  $x$ , распределенной по нормальному закону с неизвестными параметрами  $a$  и  $\sigma$ . Для этих параметров по формуле (1-2) рассчитывают статистические оценки. Доверительные интервалы для обоих параметров [Л. 10] в зависимости от достоверности  $\alpha$  и числа опытов  $N$  определяют по формулам:

$$I_M(\alpha, N) = \bar{x} \pm t_\alpha \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{N}}; \quad (1-8)$$

$$I_\sigma(\alpha, N) = \left( \bar{\sigma} \sqrt{\frac{N-1}{\chi_2^2}}; \bar{\sigma} \sqrt{\frac{N-1}{\chi_1^2}} \right), \quad (1-9)$$

где  $t_\alpha$  — квантиль распределения Стьюдента — величина, табулированная в зависимости от величины  $\alpha$  и числа степеней свободы  $N-1$ ;  $\chi_1^2$  и  $\chi_2^2$  — квантили „хи-квадрат“ распределения.

Пользуясь этими формулами, по заданным значениям  $P$  и  $\alpha$  общий доверительный интервал для величины любого параметра можно представить как

$$I_A(N) = \left\{ \begin{aligned} &\left[ \bar{a} + \bar{\sigma} \left( \frac{t_\alpha}{\sqrt{N}} + t_P \sqrt{\frac{N-1}{\chi_1^2}} \right); \right. \\ &\left. \bar{a} - \bar{\sigma} \left( \frac{t_\alpha}{\sqrt{N}} + t_P \sqrt{\frac{N-1}{\chi_2^2}} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

На практике величины технических параметров могут регламентироваться как двусторонним, так и односторонним, ограниченным сверху или снизу интервалом. В том и другом случае  $N_{\text{опт}}$  можно определить с помощью графиков, изображенных на рис. 1-6.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий приведенный выше метод расчета оптимального объема выборки:

Наружный диаметр  $D$  монтажного провода должен лежать в пределах  $1,2 \pm 0,1$  мм. Произведено 25 замеров наружного диаметра провода, результаты которых приведены в табл. 1-3.

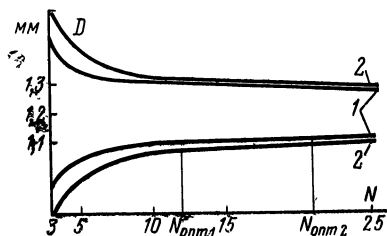


Рис. 1-7. К расчету оптимального объема выборки.

Таблица 1-3

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$D, \text{ мм}$	1,20	1,21	1,16	1,15	1,23	1,20	1,18	1,19	1,22	1,24	1,19	1,22	1,18

Продолжение табл. 1-3

Номер замера	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$D, \text{ мм}$	1,21	1,20	1,26	1,17	1,21	1,18	1,24	1,16	1,17	1,20	1,22	1,18

Требуется с достоверностями  $\alpha_1=0,8$  и  $\alpha_2=0,9$  определить оптимальный объем выборки  $N_{\text{опт}}$  для надежности оценки  $P=0,99$  ( $t_P=2,62$ ). Для построения графика  $I_D(\alpha)=f(N)$  выбираем значения  $N_i$ , равные 3, 5, 10, 15 и 25. Указанный график приведен на рис. 1-7, а расчетные данные — в табл. 1-4.

Таблица 1-4

N	$\bar{M}$	$\bar{\sigma}$	$t_\alpha$		$I_M(\alpha)$		$\chi^2_2$		$I_D(\alpha)$	
			$\alpha=0,8$	$\alpha=0,9$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,9$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,9$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,9$
3	1,19	0,033	1,886	2,92	1,16 1,22	1,14 1,24	0,211	0,103	0,93 1,45	0,84 1,54
5	1,19	0,034	1,533	2,13	1,17 1,22	1,16 1,23	1,61	1,145	1,04 1,34	0,89 1,49
10	1,20	0,029	1,383	1,833	1,19 1,21	1,18 1,22	4,17	3,22	1,096 1,306	1,073 1,327
15	1,20	0,028	1,345	1,761	1,19 1,21	1,18 1,22	7,79	6,57	1,106 1,294	1,082 1,318
25	1,20	0,027	1,318	1,711	1,195 1,205	1,19 1,21	15,66	13,85	1,118 1,282	1,106 1,294

Как видно из этих данных, при  $P=0,99$  и  $\alpha_1=0,8$  минимальный объем выборки должен быть  $N_{\text{опт1}}=12$ , а при  $\alpha_2=0,9$  —  $N_{\text{опт}}=20$ . Интересно отметить, что при расширении регламентированного диапазона величины наружного диаметра провода, допустим, до  $D=1,2\pm 0,15$  мм, оптимальные объемы выборки существенно уменьшатся ( $N_{\text{опт1}}=6$ ;  $N_{\text{опт2}}=12$ ).

## Глава вторая

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 2-1. Испытание высоким напряжением

Проверка электрической прочности изоляции является основным критерием, определяющим работоспособность монтажных проводов при воздействии различных механических, климатических и других эксплуатационных факторов.

Испытание монтажных проводов напряжением производится в соответствии с ГОСТ 2990-67, обуславливаю-



щим общие положения по проведению испытаний. При испытании экранированных монтажных проводов напряжение прикладывается между жилой и экраном; неэкранированные провода, как правило, испытывают напряжением в воде.

#### а) Выбор величины испытательного напряжения

Ниже приведены принятые в настоящее время в отечественной и зарубежной практике значения рабочего и испытательного напряжений низковольтных монтажных проводов.

Рабочее напряжение, в . . . .	100	250	500	1 000
Испытательное напряжение, в	1 200	1 500	2 000	3 000

Нетрудно заметить, что значения испытательных напряжений, приведенные выше, являются результатом применения известной формулы

$$U_{\text{исп}} = 2U_p + 1\,000. \quad (2-1)$$

Численные коэффициенты в этой формуле связаны с величиной запаса электрической прочности, принимаемой для высоковольтных кабелей. Для проводов же низкого напряжения, как правило, запас электрической прочности оказывается крайне высоким (табл. 2-1).

Таблица 2-1

Тип изоляции	Толщина изоляции, мм	Рабочее напряжение, в	Среднее пробивное напряжение, в	Коэффициент запаса электрической прочности
Полиэтилен	0,2	250	14 000	56
То же	0,3	500	21 000	42
Поливинилхлорид	0,3	250	12 000	48
Фторопласт	0,2	250	11 000	44
Кремнийорганическая резина	0,5	250	12 000	48

В связи с этим возникает проблема обоснованного выбора величины испытательного напряжения. При этом должны быть рассмотрены по крайней мере две стадии внедрения нового провода в производство: испытание высоким напряжением в процессе разработки провода при изготовлении опытных или головных партий и те же

испытания при установившемся серийном выпуске этого провода.

Решение задачи о выборе величины испытательного напряжения в процессе разработки провода и внедрения его в серийное производство связано с распределением значений пробивных напряжений этого провода.

Как было показано в гл. 1, если бы распределения значений пробивных напряжений проводов с тонкостенной изоляцией подчинялись нормальному закону, то в наших руках был бы готовый математический аппарат для оценки степени разброса этих значений (§ 1-3). Однако по своей физической сущности эти распределения не могут быть точно нормальными. Это объясняется тем, что значения пробивных напряжений, с одной стороны, не могут быть меньше нуля, с другой — они всегда ограничены величинами внутренней электрической прочности изоляции.

Вместе с тем, как часто бывает при инженерных расчетах, нас интересует не точное выражение распределения, а максимальное приближение к нему, достаточное для практического применения указанного математического аппарата. При этом критерием соответствия (согласия) рассматриваемого распределения нормальному закону можно принять достаточно близкую аппроксимацию кривой полигона накопленных частот, построенной на вероятностной бумаге, в прямую.

Для оценки вида распределения значений пробивных напряжений проводов с тонкостенной изоляцией были испытаны провода четырех типов с изоляцией из полиэтилена высокой и низкой плотности, фторопласта 40Ш и кремнийорганической резины. Конструктивные данные

Таблица 2-2<sup>1</sup>

Тип изоляции	Диаметр токо- проводящей жилы, мм	Толщина изо- ляции, мм	Длина образ- ца, м	Общее коли- чество образ- цов	Среднее зна- чение пробив- ного напряже- ния, кВ	Стандартное отклонение $\sigma$ , кВ
Полиэтилен низкой плотно- сти	0,2	0,275	100	622	13,3	2,76
Полиэтилен высокой плот- ности	0,2	0,35	1	1 096	37,72	5,81
Фторопласт 40Ш	0,9	0,3	1	437	23,16	3,02
Кремнийорганическая резина	0,9	0,5	1	505	12,2	0,74

этих проводов, объемы выборок и значения параметров распределения приведены в табл. 2-2.

Вид рассматриваемых распределений на вероятностной бумаге представлен на рис. 2-1.

Формы кривых полигонов накопленных частот распределений значений пробивных напряжений проводов разных типов, построенных на вероятностной бумаге,

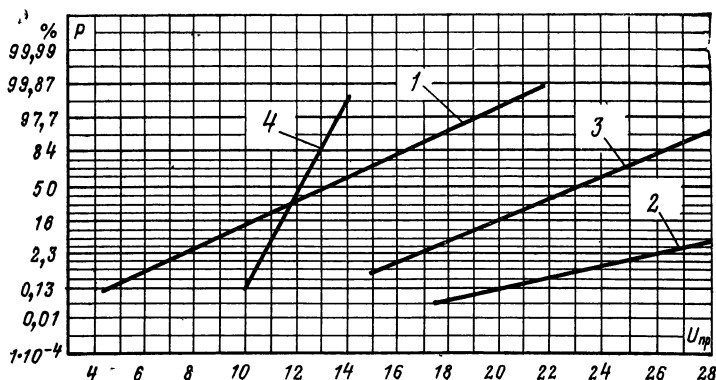


Рис. 2-1. Полигон накопленных частот значений пробивных напряжений проводов.

1 — с изоляцией из полиэтилена низкой плотности; 2 — с изоляцией из полиэтилена высокой плотности; 3 — с изоляцией из кремнийорганической резины; 4 — с изоляцией из фторопласта 4.

дают основания считать, что эти распределения действительно близки к нормальному.

Рассмотрим представленные на рис. 2-2 типичные кривые плотности распределений значений пробивного напряжения монтажного провода.

Как видно из этого рисунка, между значениями среднего пробивного напряжения провода и принятой величиной испытательного напряжения имеется весьма существенная разница.

На практике в процессе разработки и освоения провода при неустановившемся технологическом процессе его изготовления может произойти снижение электрической прочности провода (пунктирные линии на рис. 2-2), причем это снижение не может быть зафиксировано при испытаниях провода напряжением, величину которого можно найти по (2-1). Поэтому представляется целесообразным на стадии разработки и внедрения провода в серийное производство величину испытательного напря-

жения выбирать максимально близкой к пробивному напряжению этого провода по формуле

$$U_{исп} = \bar{U}_{пр} - 3\bar{\sigma} \quad (2-2)$$

Такая постановка вопроса позволит сохранить в серийном производстве уровень электрической прочности провода, достигнутый при его разработке. Однако при этом возникает ряд трудностей.

Для достоверной оценки параметров распределения значений пробивных напряжений провода необходимо

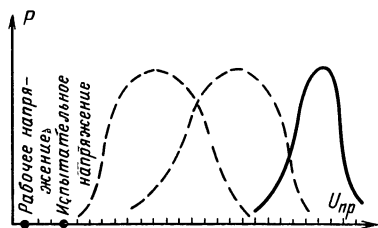


Рис. 2-2. Типичные кривые плотности распределения значений пробивного напряжения монтажного провода.

испытать достаточно большое количество образцов (обычно  $N=50 \div 100$ ). Естественно, что экономически целесообразно проводить эти испытания на образцах небольшой длины ( $l=1 \div 2$  м). Однако в производственных условиях провода испытываются высоким напряжением в строительных длинах, причем эти длины могут быть самыми различными.

Поэтому важно установить связь между результатами испытаний проводов напряжением при малых и больших длинах.

Если принять, что вероятность пробоев (слабых мест в изоляции) возрастает с увеличением поверхности провода, то с увеличением длины провода среднее пробивное напряжение будет уменьшаться. Расчет средних значений пробивных напряжений больших длин проводов по результатам испытаний коротких образцов впервые проведен С. М. Брагиным [Л. 8] и кратко заключается в следующем.

Если допустить, что распределение значений пробивных напряжений отрезков провода близко к нормальному и на отрезках длиной  $l$  определены статистические оценки параметров  $\bar{U}_l$  и  $\sigma_l$ , то эти параметры для отрезков провода длиной  $L=Nl$  можно определить как

$$\bar{U}_L = \bar{U}_l (1 - tc); \quad (2-3)$$

$$\bar{\sigma}_L = \bar{\sigma}_l (1 - tc), \quad (2-4)$$

где  $t$  — квантиль нормального распределения, определяемая по таблицам из соотношения

$$z(t) = (N-1)/N, \quad (2-5)$$

$z(t)$  — табличный гауссовский интеграл.

Приведенные выше формулы справедливы при допущении, что величина коэффициента вариации постоянна для любых длин провода:

$$c = \frac{\bar{\sigma}_L}{\bar{U}_L} = \frac{\bar{\sigma}_N}{\bar{U}_N} = \text{const.} \quad (2-6)$$

Испытания проводов различной длины подтвердили приемлемость такого допущения для изделий с достаточно стабильной технологией (табл. 2-3).

Таблица 2-3

Длина провода, м	Значения параметров распределения					
	Экспериментальные			Расчетные		
	$\bar{U}$ , кв	$\bar{\sigma}$ , кв	$c$	$\bar{U}$ , кв	$\bar{\sigma}$ , кв	$c$
1	22,4	2,4	0,107	—	—	—
5	20,1	2,16	0,103	19,3	2,1	0,107
10	18,1	1,99	0,110	18,4	2,0	0,107
50	17,2	1,81	0,105	16,8	1,8	0,107
100	16,0	1,73	0,108	16,2	1,7	0,107

Величина испытательного напряжения провода может быть рассчитана по формуле

$$U_{\text{исп}} = \bar{U}_L - t_P \bar{\sigma}_L \quad (2-7)$$

или

$$\begin{aligned} U_{\text{исп}} &= \bar{U}_L (1 - tc) - t_P c \bar{U}_L (1 - tc) = \\ &= \bar{U}_L (1 - tc) (1 - t_P c), \end{aligned} \quad (2-8)$$

где  $t_P$  — квантиль нормального распределения, соответствующая надежности оценки  $P$ .

Рассмотрим в качестве примера расчет испытательного напряжения для проводов с изоляцией из полиэтилена высокой плотности толщиной 0,25 мм (рабочее напряжение 250 в). Испытательное напряжение для этих проводов принято 1500 в. Провода выпускаются стандартными длинами, равными 500 м.



При испытании нескольких партий образцов метро-  
вой длины установлено, что

$$\bar{U}_{\text{ср}} = 22,1 \text{ кВ}; \bar{c}_{\text{ср}} = 0,108; \bar{\sigma}_U = 1,42 \text{ кВ}; \sigma_c = 0,012,$$

а распределение значений параметров  $U_l$  и  $c$  близко  
к нормальному закону. Определим с помощью «правила  
трех сигм» крайние значения этих параметров:

$$\bar{U}_{l \text{ мин}} = \bar{U}_{l \text{ ср}} - 3\bar{\sigma}_{\bar{U}_l}; \quad (2-9)$$

$$c_{\text{макс}} = \bar{c}_{\text{ср}} + 3\sigma_c, \quad (2-10)$$

т. е.

$$\bar{U}_{l \text{ мин}} = 22,1 - 3 \cdot 1,42 = 17,84 \text{ кВ};$$

$$c_{\text{макс}} = 0,108 + 3 \cdot 0,012 = 0,144.$$

По формуле (2-5) находим:

$$z(t) = \frac{500 - 1}{500} = 0,998; t = 3 \text{ и } P = 0,99; t_p = 2,62.$$

Тогда величина испытательного напряжения для дан-  
ного провода будет равна:

$$U_{\text{исп}} = 17,84(1 - 3 \cdot 0,144)(1 - 2,62 \cdot 0,144) = 6,3 \text{ кВ}.$$

Несмотря на усложнение процесса испытаний, ука-  
занную методику выбора величины испытательного на-  
пряжения целесообразно применять для всех проводов  
ответственного назначения при их разработке и внедре-  
нии в серийное производство. Успешные испытания могут  
дать уверенность в сохранении уровня электрической  
прочности провода, достигнутого при разработке, и на-  
оборот, массовые пробой при этих испытаниях укажут на  
существенные отклонения от принятых технологических  
режимов.

Следует, однако, иметь в виду, что в случае прило-  
жения к проводу такого высокого напряжения возможно  
возникновение ионизации воздушных включений как  
в самой изоляции, так и на границе металл — диэлектрик  
и связанное с этим необратимое ухудшение электриче-  
ских свойств изоляции. Этого можно избежать, если про-  
водить указанные испытания напряжением постоянного  
тока, при котором эти явления практически отсутствуют.  
После освоения провода, когда в процессе серийного  
производства стабилизируются технологические процес-

сы его изготовления, необходимость в стопроцентных испытаниях повышенным напряжением отпадает. На этой стадии провод целесообразно испытывать напряжением, величину которого можно найти по (2-1). При этом цель этих испытаний будет иная, чем при испытаниях повышенным напряжением, а именно отбраковать случайные, не свойственные выбранному технологическому процессу изолирования дефекты, такие, как порезы, проколы, смятия изоляции, грубые инородные включения и т. д.

Приведенный выше метод пересчета среднего пробивного напряжения проводов больших длин по результатам испытаний коротких образцов имеет большое практическое значение еще и потому, что позволяет заранее оценивать выход годной продукции при 100%-ных испытаниях проводов напряжением.

Рассмотрим пример. Пусть при испытаниях метровых образцов провода с рабочим напряжением 250 в и нормальной строительной длиной  $L=100$  м получены следующие результаты

$$\bar{U}=10 \text{ кВ}; \bar{\sigma}=2,5 \text{ кВ} \text{ и } c=0,25.$$

Требуется определить процент выхода кондиционного провода после испытания напряжением 1 500 в.

В соответствии с формулой (2-5)

$$z(t) = \frac{N-1}{N} = 0,99,$$

откуда  $t=2,6$ ; тогда

$$\bar{U}_{100} = \bar{U}_1 (1 - tc) = 10 (1 - 2,6 \cdot 0,25) = 3,5 \text{ кВ};$$

$$\bar{\sigma}_{100} = \bar{\sigma}_1 (1 - tc) = 2,5 (1 - 2,6 \cdot 0,25) = 0,88 \text{ кВ}.$$

Процент выхода кондиционного провода можно определить по формуле

$$\Gamma = z(t') 100, \quad (2-11)$$

где

$$t' = (\bar{U}_L - U_{исп}) / \sigma_L \quad (2-12)$$

(для нашего примера  $\Gamma=70\%$ ).

Применение подобных расчетов особенно эффективно на стадии освоения производства проводов, так как позволяет обоснованно определять требуемые мощности и материалы с учетом потерь, связанных с освоением новой продукции.

## **б) Возможность многократных испытаний монтажных проводов высоким напряжением**

Как указывалось выше, монтажные провода помимо заводских испытаний, как правило, подвергаются многократным испытаниям высоким напряжением на месте потребления. Такие испытания проводятся в процессе монтажа аппаратуры и на готовых изделиях, и количество их определяется назначением и сложностью аппаратуры.

Вопрос о допустимости многократных испытаний проводов повышенным напряжением весьма важен для практики, и в последнее время в этой области проведен ряд исследований. Так, Фостером и др. [Л. 55] были проведены испытания монтажных проводов, изолированных политетрафторэтиленом на рабочее напряжение 600 и 1 000 в (типы E и EE по MIL-W-16878) на стойкость к многократным воздействиям высокого напряжения. Эти испытания показали, что достаточное количество таких воздействий можно допустить только при испытательных напряжениях, ориентировочно определяемых из формулы (2-1). Увеличение испытательного напряжения на 1—1,5 кв резко снижает допустимое количество испытаний. По-видимому, это явление тесно связано с короностойкостью материала изоляции. Как известно, политетрафторэтилен обладает весьма низкой короностойкостью. Поэтому при увеличении испытательного напряжения до величины, превышающей напряжение начала внутренней ионизации, многократные испытания провода таким напряжением приводят к необратимым изменениям свойств изоляции.

Результаты испытаний электрической прочности проводов после многократного приложения испытательного напряжения приведены в табл. 2-4.

Для испытаний были выбраны провода с изоляцией из полиэтилена, поливинилхлорида, кремнийорганической резины и политетрафторэтилена с рабочим напряжением 500 в. В качестве критерия стойкости проводов к многократному воздействию испытательного напряжения было выбрано постоянство значений пробивного напряжения образцов. Образцы испытывались напряжением 2, 3 и 4 кв в течение 1 мин. После соответствующего количества циклов напряжение поднималось до пробоя образцов. Длина образцов составляла 10 м.

Таблица 2-4

Тип изоляции	Среднее значение напряжения начала короны, кВ	Пробивное напряжение, кВ								
		до испытаний	после 5 циклов при напряжениях, кВ			после 10 циклов при напряжениях, кВ			после 25 циклов при напряжениях, кВ	
			2	3	4	2	3	4	2	3
Полиэтилен	2,2	24,4	24,6	23,8	23,1	25,1	24,1	24,2	23,8	23,6
Поливинилхлорид	2,06	14,3	14,6	12,8	10,8	13,9	11,3	9,2	14,2	8,7
Кремнийорганическая резина	1,95	12,6	12,7	12,4	12,2	12,6	12,8	12,1	12,3	12,2
Политетрафторэтилен	2,1	13,3	13,3	12,8	10,6	13,2	8,6	6,9	13,0	6,1

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

величины испытательных напряжений, найденные по (2-1), являются безопасными с точки зрения многократных испытаний у потребителя для проводов с любым видом изоляции;

при увеличении испытательного напряжения многократные испытания могут быть допущены только для проводов с изоляцией из короностойких материалов (например, полиэтилен и кремнийорганическая резина).

#### **в) Эквивалентные значения испытательных напряжений монтажных проводов на переменном и постоянном токах**

Рассмотрим весьма важный для практики вопрос об эквивалентных значениях рабочих и испытательных напряжений низковольтных монтажных проводов при постоянном токе и переменном токе промышленной частоты.

Как известно, электрическая прочность любых изоляционных конструкций при постоянном токе значительно выше, чем при переменном. Это объясняется меньшей интенсивностью ионизационных процессов в случае приложения напряжения постоянного тока. Для монтажных проводов низкого напряжения средняя величина пробивного напряжения при постоянном токе в 2—4 раза больше, чем при переменном. Эта величина могла бы служить ориентировочным критерием эквивалентности рабочих и испытательных напряжений при переменном и постоянном токах. Однако многочисленные испытания

монтажных проводов и статистическая обработка результатов этих испытаний показывает, что значения пробивных напряжений проводов при постоянном токе, как правило, имеют больший разброс, чем при переменном токе. По-видимому, это можно объяснить тем, что при переменном токе пробой изоляции вызывается в основном ионизационными процессами в воздушных включениях, находящихся на границе жила — изоляция, в то время как при постоянном токе величина среднего пробивного напряжения больше зависит от однородности материала изоляции. Поскольку воздушные включения между жилой и изоляцией неизбежны для любого типа провода, а их распределение по длине провода достаточно однородно, стабильность величины пробивного напряжения при переменном токе выше, чем при постоянном.

Таким образом, при выборе эквивалентных значений рабочих и испытательных напряжений при переменном и постоянном токах необходимо учитывать не только отношения средних значений пробивных напряжений, но и величину разброса этих значений. В связи с этим коэффициент эквивалентности напряжений на переменном и постоянном токах можно определить по формуле

$$k_{\text{экв}} = (\bar{U} - 3\bar{\sigma}) / (\bar{U}' - 3\bar{\sigma}'), \quad (2-13)$$

где  $\bar{U}$  и  $\bar{\sigma}$  — статистические параметры распределения значений пробивных напряжений на постоянном токе.  $\bar{U}'$  и  $\bar{\sigma}'$  — то же на переменном токе.

В табл. 2-5 приведены значения параметров распределений пробивных напряжений, рассчитанных по результатам испытаний проводов разных типов.

Таблица 2-5

Тип изоляции	Величины параметров распределений пробивных напряжений, кВ				Значение коэф- фициента экви- валентности $k_{\text{экв}}$
	Переменный ток		Постоянный ток		
	$\bar{U}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{U}$	$\bar{\sigma}$	
Поливинилхлорид	12,02	1,72	47,7	8,8	3,10
Полиэтилен	24,24	2,96	66,88	15,36	1,36
Лавсан	14,5	0,94	34,0	4,95	1,64
Фторопласт 40Ш	10,05	0,57	35,3	5,86	2,12
Фторопласт 4	17,64	0,68	24,64	1,68	2,05
Кремнийорганическая резина	12,6	2,02	26,3	4,1	2,04

Анализ данных, приведенных в табл. 2-5, дает основание сделать следующий вывод: ориентировочная величина коэффициента эквивалентности рабочих и испытательных напряжений при переменном и постоянном токах может быть выбрана равной 1,5. Небезынтересно отметить, что для монтажных проводов, выпускаемых в США (MIL-W-16878) величина этого коэффициента принята равной 1,4.

Ориентировочные рекомендации по величинам рабочих и испытательных напряжений на переменном и постоянном токах приведены в табл. 2-6.

Т а б л и ц а 2-6

Рабочее напряжение, в		Испытательное напряжение, в	
Переменный ток	Постоянный ток	Переменный ток	Постоянный ток
100	150	1 000	1 500
250	400	1 500	2 500
500	750	2 000	3 000
1 000	1 500	3 000	4 500

### г) Эффективность испытаний проводов напряжением на аппаратах сухого испытания

Как указывалось выше, испытания высоким напряжением неэкранированных монтажных проводов проводятся в воде. Учитывая, что современные монтажные провода изготавливаются на высокопроизводительных автоматизированных линиях, эти испытания являются одной из наиболее трудоемких операций технологического цикла изготовления этих проводов. В условиях массового производства проведение таких испытаний требует существенного увеличения производственных площадей, численности обслуживающего персонала и организационных усилий по транспортированию продукции к испытательной станции и сушке проводов после испытаний. Вместе с тем кабельная промышленность в достаточной степени оснащена аппаратами сухого испытания (АСИ) разных типов, позволяющими производить испытания проводов высоким напряжением непосредственно в процессе производства, что значительно упрощает технологический процесс их изготовления.

Однако среди специалистов распространено мнение, что испытания проводов в воде и на АСИ не могут быть эквивалентными, что испытания в воде являются более жесткими, а следовательно, и более надежными.

При этом обычно указывают на три принципиальных фактора, отличающих условия проведения этих испытаний:

при испытаниях в воде последняя, являясь электродом, смачивает всю поверхность провода, и испытательное

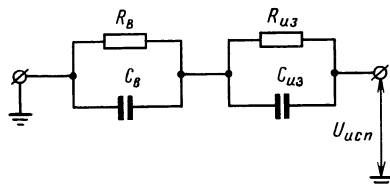


Рис. 2-3. Схема замещения провода в электроде АСИ.

напряжение подается ко всей поверхности изоляции. При испытаниях же на АСИ только небольшая часть поверхности провода касается электрода; между проводом и электродом местами имеется воздушный промежуток, что может привести к существенному умень-

шению величины напряжения, приходящегося на слой изоляции;

при испытаниях в воде время приложения напряжения к проводу, как правило, не менее 1 мин, в то время как на АСИ каждый отрезок провода находится под напряжением от 0,01 до 0,5 сек;

наконец, при испытаниях в воде провод до подачи напряжения обычно выдерживается в воде от нескольких минут до нескольких часов; если изоляция провода не влагостойка, то в процессе увлажнения ее электрическая прочность может снизиться, чего, разумеется, не будет при испытаниях на АСИ.

Рассмотрим электрические процессы, происходящие в электроде АСИ при статическом испытании провода [Л. 18]. Возьмем крайний случай, когда между проводом и электродом имеется сплошной слой воздуха толщиной  $\Delta$ . Схема замещения для такого случая представлена на рис. 2-3.

При низком напряжении, недостаточном для ионизации воздушного промежутка, общее испытательное напряжение распределится между воздухом и изоляцией провода обратно пропорционально емкостям:

$$U_{исп} = U_в + U_{из} = U_в \left( 1 + \frac{C_в}{C_{из}} \right). \quad (2-14)$$

Приняв для простоты, что  $C_{из} \gg C_в$ , получим:

$$U_{исп} \approx U_в$$

Таким образом, при низком испытательном напряжении почти все оно будет приходиться на воздушный промежуток, а изоляция провода, действительно, не будет практически подвергаться воздействию напряжения. Однако если повышать приложенное к электроду напряжение до значения  $U_{\text{исп макс}} = U_{\text{разр}}$ , соответствующего пробивному напряжению воздушного промежутка, то проводимость воздуха резко возрастет и произойдет перераспределение напряжений между воздушным промежутком и проводом таким образом, что большая часть напряжения будет приходиться на изоляцию провода. Механизм разрядов и распределения напряжений между воздухом и диэлектриком аналогичен описанному в [Л. 6].

Приведенные выше соображения были проверены экспериментально на модели электрода АСИ, показанного на рис. 2-4.

Испытываемый провод помещался в металлическую трубку длиной 50 мм. Испытательное напряжение прикладывалось между корпусом трубки и жилой провода. В процессе испытаний измерялось напряжение на воздушном промежутке и на изоляции провода. Для этого на провод надевалась металлическая оплетка, служившая зондом для снятия потенциала с поверхности провода. Для повышения точности измерений длина провода в оплетке выбиралась такой, чтобы сохранить условие  $C_{\text{из}} \gg C_{\text{в}}$ . Испытания проводились на различных конструкциях проводов при различных воздушных зазорах. Результаты испытаний приведены в табл. 2-7.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных по распределению напряжения между воздушным промежутком и изоляцией провода  $U_{\text{пров}}$  показано на рис. 2-5. Как видно из кривых, сходимость расчетных и экспериментальных данных вполне приемлемая.

Таким образом, можно считать установленным, что при испытательном напряжении превышающем пробивное напряжение воздушного промежутка, на изоляцию провода приходится не менее 70—90% всего приложенного напряжения. Величина же пробивного напряжения воздуха определяется в зависимости от конструкции электрода исходя из ориентировочного значения электрической прочности воздуха 1,5—2,0 кВ/мм. Следовательно, для конкретной конструкции элект-

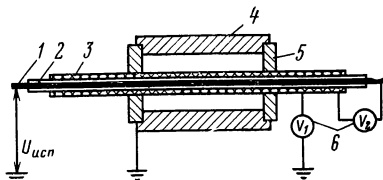


Рис. 2-4. Схема модели электрода АСИ.

1 — токопроводящая жила; 2 — изоляция; 3 — экран; 4 — трубка-электрод; 5 — изоляционные шайбы, 6 — вольтметры.

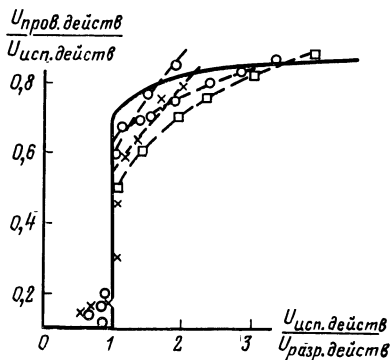


Рис. 2-5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных.

— — — расчетные данные;  
— — — экспериментальные данные.





трода АСИ можно рассчитать минимальную величину испытательного напряжения, при котором изоляция провода с точки зрения величины приложенного напряжения будет находиться в тех же условиях, что и при испытаниях в воде. При этом, если испытательное напряжение достаточно велико, то конструкция электрода при статических испытаниях уже не влияет на результаты, и условия испытаний образцов провода на АСИ и в воде практически равноценны. Последнее соображение иллюстрируется следующим экспериментом. Образцы проводов с тонкостенной полиэтиленовой изоляцией длиной 1 м испытывались в воде и в электроде АСИ до пробоя при различной скорости подъема напряжения. К образцам прикладывалось начальное напряжение, которое затем ступенчато поднималось до пробоя образцов с определенной выдержкой на каждой ступени. Испытывалось по 10 образцов провода при каждом режиме. Затем определялось среднее значение пробивного напряжения и значение коэффициента вариации, характеризующее степень разброса показателей. Результаты испытаний приведены в табл. 2-8.

Т а б л и ц а 2-8

Условия испытаний			Результаты испытаний			
Начальное напряжение, кв	Ступень напряжения, кв	Время выдержки на ступени, сек	В воде		На АСИ	
			$\bar{U}$ , кв	$\sigma$	$U$ , кв	$\sigma$
5	2	60	8,6	0,14	8,7	0,12
10	2	60	12,0	0,06	12,5	0,12
10	2	30	12,6	0,08	12,7	0,07
10	2	10	13,2	0,10	13,6	0,10
10	2	5	14,8	0,11	15,2	0,11
Подъем напряжения до пробоя за 5—7 сек			16,9	0,13	16,9	0,06

Приведенные выше эксперименты проводились в статических условиях. На практике испытания в таких условиях проводятся только в воде, а испытания проводов на АСИ производят на проход, причем время пребывания провода под напряжением составляет доли секунды.

Таким образом, проблема заключается в том, чтобы определить такое значение испытательного напряжения на АСИ (при конкретном времени пребывания провода в электроде), которое по своей эффективности воздействия на изоляцию провода не уступало бы статическим испытаниям провода в воде.

Как указывалось выше, при установившемся уровне технологии распределение значений пробивных напряжений проводов с тонкостенной изоляцией близко к нормальному, а значение испытательного напряжения выбирается таким образом, чтобы при массовом выпуске проводов процент выхода годной продукции приближался к 100. При этом любые существенные отклонения от принятого технологического процесса сразу сказываются на результатах испытаний проводов напряжением. Таким образом, величина испытательного напряжения непосредственно связана с параметрами распределения значений пробивных напряжений проводов.

Поэтому одним из путей выбора величины эффективного испытательного напряжения на АСИ может явиться оценка параметров распределения пробивных напряжений проводов при заданном режиме испытаний и определение такой величины напряжения, при котором вероятность пробоя изоляции будет той же, что и при испытаниях этих проводов в воде.

Условие эффективности испытаний на АСИ может быть записано как

$$\frac{\bar{U}_{\text{а.пр}} - U_{\text{а.исп}}}{\sigma_{\text{а}}} \leq \frac{\bar{U}_{\text{в.пр}} - U_{\text{в.исп}}}{\sigma_{\text{в}}} \quad (2-15)$$

или

$$U_{\text{а.исп}} \geq U_{\text{а.пр}} - (\bar{U}_{\text{в.пр}} - U_{\text{в.исп}}) \frac{\sigma_{\text{а}}}{\sigma_{\text{в}}}, \quad (2-16)$$

где  $\bar{U}_{\text{в.пр}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$  и  $U_{\text{а.пр}}$ ,  $\sigma_{\text{а}}$  — соответственно параметры распределений пробивных напряжений одинаковых длин проводов при испытаниях в воде и на АСИ.

Оценка величин  $\bar{U}_{\text{а.пр}}$  и  $\sigma_{\text{а}}$  может быть получена из следующего эксперимента. Через АСИ с заданной конструкцией электрода с определенной скоростью перематывается отрезок провода длиной  $l$  при напряжении  $U_{\text{исп}}$  и фиксируется количество пробоев  $m_1$ . Для упрощения и удешевления эксперимента расчетная длина отрезка провода принимается равной 1 м. Это значит, что если на длине 1 м произошло более одного пробоя, то они считаются за один пробой. Затем определяется вероятность пробоя отрезка провода при напряжении  $U_{\text{исп1}}$

$$P_1 = m_1/l.$$

После этого эксперимент повторяется при напряжении  $U_{\text{исп2}}$  и определяется величина

$$P_2 = m_2/l.$$

Зная величины  $P_1$  и  $P_2$  и считая распределение пробивных напряжений близким к нормальному, по таблицам определяют величины  $t_{P1}$  и  $t_{P2}$ , а затем из системы уравнений

$$t_{P1} = \frac{\bar{U}_{\text{а.пр}} - U_{\text{исп1}}}{\sigma_{\text{а}}};$$

$$t_{P2} = \frac{U_{\text{а.пр}} - U_{\text{исп2}}}{\sigma_{\text{а}}}$$

— величины  $\bar{U}_{\text{а.пр}}$  и  $\sigma_{\text{а}}$ .

Т а б л и ц а 2-9

Длина провода, м	$U_{\text{исп}}, \text{кВ}$	$m_i$	$P_i$	$z(t_{Pi})$	$t_{Pi}$
300	5	0	0	1	5
300	13	1	0,00333	0,9933	2,715
300	15	7	0,02333	0,9534	1,99
300	17	22	0,07333	0,8532	1,45

В табл. 2-9 приведены экспериментальные и расчетные данные по оценке параметров распределения пробивных напряжений проводов марки МПМ-0,35 при скорости перемотки на АСИ 120 м/мин (время нахождения отрезка провода в электроде 0,2 сек).

Если взять любую пару из приведенных в табл. 2-9 значений  $t_{pi}$ , то определим  $\bar{U}_{a.пр}$  и  $\bar{\sigma}_a$ . Для описанного эксперимента значения этих параметров равны  $U_{a.пр} = 22,4$  кВ и  $\bar{\sigma}_a = 3,7$  кВ.

Следует подчеркнуть, что для других скоростных режимов испытаний значения  $\bar{U}_{a.пр}$  и  $\bar{\sigma}_a$  будут другими. Так, испытания того же провода при скорости перемотки 40 м/мин (время нахождения отрезка провода в электроде 0,65 сек дали следующие результаты:

$U_{a.пр} = 19,5$  кВ и  $\bar{\sigma}_a = 2,6$  кВ. Поэтому величину эффективного испытательного напряжения на АСИ необходимо выбирать для каждой скорости перемотки. Экспериментальная зависимость среднего пробивного напряжения провода МПМ-0,35 от скорости перемотки через АСИ при длине электрода 0,4 м приведена на рис. 2-6.

Аналогичным образом можно оценить параметры распределения пробивных напряжений проводов при испытании в воде. Так, в табл. 2-10 приведены экспериментальные и расчетные данные по испытаниям 300 отрезков, равных 1 м, того же провода в течение 1 мин в воде при разных значениях испытательного напряжения.

Таблица 2-10

$U_{исп}, \text{кВ}$	$m_i$	$P_i$	$z(t_{pi})$	$t_{pi}$
8	3	0,01	0,98	2,33
10	15	0,05	0,90	1,65
12	60	0,20	0,60	0,84

Обработка данных, приведенных в табл. 2-10, дала следующие результаты:  $\bar{U}_{в.пр} = 14,0$  кВ и  $\bar{\sigma}_в = 2,4$  кВ.

Используя формулу (2-18), можно рассчитать испытательное напряжение на АСИ (при  $v = 120$  м/мин и  $L = 0,4$  м) для провода марки МПМ-0,35, которое по своей эффективности не уступает испытанию в течение 1 мин в воде при принятом для этого провода  $U_{исп} = 1,5$  кВ.

$$\begin{aligned} \bar{U}_{a.исп} &= \bar{U}_{a.пр} - (\bar{U}_{в.пр} - U_{в.исп}) \frac{\bar{\sigma}_a}{\bar{\sigma}_в} = \\ &= 22,4 - (14 - 1,5) \frac{3,7}{2,4} = 22,4 - 18,8 = 3,6 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

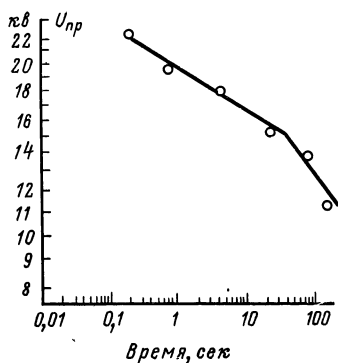


Рис. 2-6. Зависимость пробивного напряжения провода от длительности выдержки под напряжением.

Как видно из табл. 2-5, такое напряжение на изоляции провода может быть при величине испытательного напряжения на АСИ около 5—5,5 кв. Экспериментальная проверка эффективности предлагаемого способа выбора режима испытаний на АСИ дала положительные результаты. Так, после испытаний 75 км провода с полиэтиленовой изоляцией на АСИ в режиме испытаний, выбранном по описанному выше способу, провод наматывался на бухты длиной 500 м и испытывался в воде с выдержкой под напряжением в течение 1 мин. Все 150 бухт провода выдержали эти испытания.

## 2-2. Сопротивление изоляции

Величина сопротивления изоляции наряду с величиной электрической прочности является одной из основных характеристик, определяющих работоспособность монтажных проводов в условиях эксплуатации при воздействии различных механических, климатических и других факторов.

Испытание проводов высоким напряжением и измерение сопротивления изоляции обычно производится на одних и тех же образцах путем создания разности потенциалов между жилой и электродом. Однако эти испытания не являются эквивалентными. Чистая, сухая изоляция может иметь высокое сопротивление, но пробиваться при сравнительно низком испытательном напряжении из-за наличия воздушных включений. И наоборот, увлажненная и загрязненная изоляция, имеющая низкое сопротивление, может выдерживать достаточно высокое испытательное напряжение.

В ряде случаев величина сопротивления изоляции является более чутким по сравнению с испытанием напряжением критерием оценки работоспособности проводов под влиянием некоторых факторов, таких, например, как повышенные температура и влажность, проникающая радиация и т. д. Знание величины сопротивления изоляции в различных эксплуатационных условиях бывает важно для оценки работоспособности некоторых схем аппаратуры, в частности измерительных, так как резкое уменьшение сопротивления в определенных условиях приводит к нарушению нормальной работы схем из-за возрастания токов утечки.

Величину сопротивления изоляции рассчитывают по формуле

$$R_{из} = \frac{\rho_v}{2\pi l} \ln \frac{D}{d}, \quad (2-17)$$

где  $\rho_v$  — удельное объемное сопротивление материала изоляции;  $l$  — длина измеряемого отрезка провода;  $d$  — диаметр жилы;  $D$  — наружный диаметр провода.

Величины  $\rho_v$  основных изоляционных материалов, используемых для изготовления монтажных проводов, приведены в табл. 2-11.

Таблица 2-11

Материал изоляции	Величина $\rho_v$ , ом·см		
	в нормальных условиях	при повышенной влажности	при повышенной температуре
Полиэтилен	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{15}$
Полиэтиленфторэтилен	$1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$
Поливинилхлорид	$3 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11}$
Кремнийорганическая резина	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{11}$

Измерение сопротивления изоляции кабелей и проводов производится в соответствии с ГОСТ 3345-67. Для измерения сопротивления изоляции монтажных проводов используют многопредельные мегомметры и тераомметры с непосредственным отсчетом величины измеряемого сопротивления.

Основные технические характеристики этих приборов приведены в табл. 2-12.

В связи с тем, что в соответствии с ГОСТ 3345-67 измерение сопротивления изоляции рекомендуется про-

Таблица 2-12

Наименование и тип прибора	Максимальное напряжение, в	Погрешность измерения (максимальная), %	Верхний предел измерения, Мом
Мегомметр МОМ-4	105	$\pm 20$	$1 \cdot 10^7$
Мегомметр МОМ-3	150	$\pm 2,5$	$1 \cdot 10^8$
Мегомметр МЕ-8	150	$\pm 10$	$1 \cdot 10^8$
Тераомметр ТО-1	100	$\pm 20$	$1 \cdot 10^8$
Тераомметр ТО-2	100	$\pm 20$	$3 \cdot 10^8$
Тераомметр Ф-57	120	$\pm 1,5$	$1 \cdot 10^8$
Тераомметр 1001	1 000	$\pm 1,5$	$5 \cdot 10^7$
Тераомметр ЕК-67	1 000	$\pm 10$	$1 \cdot 10^{11}$

Таблица 2-13

Тип изоляции	Сопротивление изоляции, Мом·м								
	в нормальных условиях при напряжении, в			после 24 ч пребывания в воде при напряжении, в			после 48 ч пребывания в воде при напряжении, в		
	100	500	1000	100	500	1000	100	500	1000
Полиэтилен	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$
Политетрафторэтилен	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$
Поливинилхлорид	$3,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$

изводить при напряжении до 500 в, для выяснения возможности применять указанные приборы весьма важно определить влияние величины напряжения на результаты измерения сопротивления изоляции. Для этого образцы

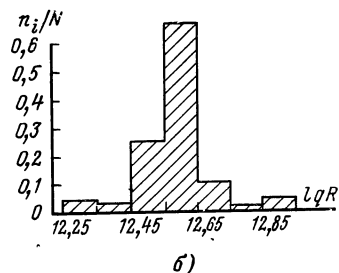
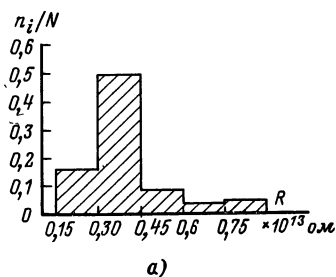


Рис. 2-7. Гистограммы распределений натуральных значений величины сопротивления изоляции и их логарифмов.

а — для натуральных значений;  
б — для логарифмов.

проводов с разными типами изоляции испытывали в нормальных условиях, а также после 24 и 48 ч пребывания в воде при напряжении 100, 500 и 1 000 в. Для измерений использовался тераомметр типа 1001 производства ГДР с пределами измерений  $1 \cdot 10^6$ — $5 \cdot 10^7$  Мом. Результаты измерений приведены в табл. 2-13.

Эти измерения показывают, что практически величина сопротивления изоляции в определенных пределах не зависит от величины прикладываемого напряжения. Это обстоятельство позволяет обоснованно применять указанные в табл. 2-12 приборы.

Измерение сопротивления изоляции незранированных проводов в нормальных условиях производят в воде на строительных длинах. Сопротивление изоляции экра-

нированных проводов измеряют, используя в качестве второго электрода экран.

В условиях повышенной влажности и высоких температур измерения сопротивления изоляции ведут на образцах. В этих случаях в качестве второго электрода используют либо экранирующую оплетку, либо металлический стержень, на который наматывают образец провода.

В последнем случае погрешностью, которую вносит сокращение площади соприкосновения изоляции с электродом, пренебрегают.

Сопротивление изоляции является крайне неустойчивым параметром. Это видно из того, что результаты измерений больших партий образцов, представленные в виде гистограмм, подчиняются весьма прихотливым распределениям.

На рис. 2-7,а приведена гистограмма результатов измерения сопротивления изоляции проводов, изолированных полиэтиленом низкого давления с наружной капроновой оболочкой. Особенностью гистограммы является то, что 13% всех результатов имеют значения, более чем в полтора раза превосходящие наиболее часто встречающиеся. Резко выраженная асимметрия распределения указывает на то, что в этом случае нельзя использовать нормальное распределение.

Выше было отмечено, что удобной и весьма часто встречающейся аппроксимацией несимметричных распределений является нормально-логарифмическое распределение. Однако, хотя гистограмма логарифмов значений сопротивления изоляции приняла более компактный вид (рис. 2-7,б), график, вычерченный на вероятностной бумаге (рис. 2-8), показывает, что распределение не может быть принято логарифмически нормальным.

Более тщательное рассмотрение вопроса приводит к заключению, что получаемые эмпирические распределения относятся к классу так называемых экстремальных распределений, частным случаем которых является распределение Вейбулла. Функция распределения вероятностей Вейбулла имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{x}{a} \right)^b \right\}, \quad (2-18)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры, являющиеся постоянными величинами.

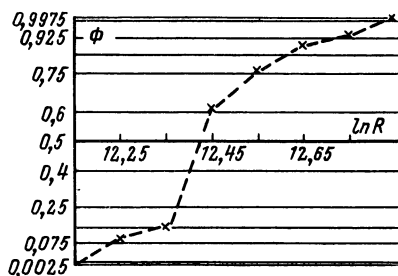


Рис. 2-8. Характерные распределения логарифмов значений величин сопротивления изоляции в нормально-вероятностном масштабе.



Построение приближений эмпирических распределений к распределению Вейбулла сводится к нахождению оценок параметров  $a$  и  $b$ .

Обычно для нахождения оценок параметров применяют различные методы последовательных приближений, сходимость которых зависит от величины искомых параметров. Можно указать и другой, более простой и экономичный способ, основанный на применении метода наименьших квадратов.

Вводя функцию

$$P(x) = 1 - F(x) = \exp \left\{ - \left( \frac{x}{a} \right)^b \right\}$$

и дважды логарифмируя ее, получаем:

$$\ln(-\ln P) = b \ln x - b \ln a. \quad (2-19)$$

Обозначим

$$w = \ln(-\ln P); u = \ln x; u_0 = \ln a.$$

Выражение (2-19) в новых обозначениях представляет собой уравнение прямой линии

$$w = bu - bu_0. \quad (2-20)$$

Эмпирическое распределение в виде гистограммы эквивалентно заданию центров интервалов группировки данных, и частот попадания наблюдаемых величин в каждый интервал. Обозначим центры интервалов группировки через  $x_i$ , частоты попадания  $f_i$  и накопленные частоты  $F_i$ :

$$F_i = \sum_{k=1}^i f_k.$$

Зная накопленные частоты, можно вычислить величины

$$P_i = 1 - F_i$$

и, наконец, величины

$$w_i = \ln(-\ln P_i).$$

В табл. 2-14 приведены все эти величины для гистограммы, изображенной на рис. 2-7,б.

Таблица 2-14

$x_i$	$u_i$	$f_i$	$F_i$	$P_i$	$w_i$
12,2	2,499	0,0083	0,0083	0,9917	-4,783
12,3	2,508	0,0833	0,0917	0,9083	-2,342
12,4	2,517	0,0667	0,1583	0,8417	-1,758
12,5	2,526	0,4833	0,6417	0,3583	0,0259
12,6	2,535	0,1333	0,7750	0,225	0,3999
12,7	2,543	0,1333	0,9083	0,0917	0,8711
12,8	2,552	0,025	0,9333	0,0667	0,9962
12,9	2,561	0,0667	1,0000	0,000000004	2,966

Поскольку из (2-20) следует, что  $w$  является линейной функцией  $u$  с угловым коэффициентом  $b$ , для оценки этого коэффициента, а также  $u_0$  можно использовать метод наименьших квадратов, т. е. уравнения линейной регрессии [Л. 47].

Согласно этим уравнениям

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n u_i w_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n u_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n u_i \right)^2}, \quad (2-21)$$

$$u_0 = \bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( u_i - \frac{w_i}{b} \right). \quad (2-22)$$

Таким образом, для рассматриваемого варианта находим следующие оценки параметров:

$$b = 107,83; u_0 = \ln a = 2,534.$$

После нахождения оценок естественно с помощью критериев согласия проверить гипотезу о том, что рассматриваемое эмпирическое распределение удовлетворительно аппроксимируется распределением Вейбулла с найденными параметрами. Проверку гипотезы, сформулированной выше, проводят с помощью критерия Пирсона. Из рис. 2-9 непосредственно видно, что совокупность точек, соответствующая эмпирическому распределению, вполне удовлетворительно располагается относительно прямой линии, реализующей на графике распределение Вейбулла.

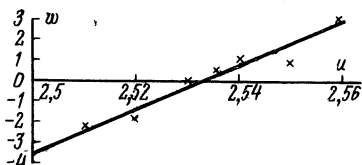


Рис. 2-9. Аппроксимация эмпирического распределения распределением Вейбулла в вероятностной шкале.

Сравнение функции распределения Вейбулла с накопленными частотами гистограммы, изображенной на 2-7,6, дано в табл. 2-15.

Т а б л и ц а 2-15

$F_{\text{эмп}}$	0,0083	0,0917	0,1583	0,6417	0,775	0,9083	0,933	1
$F(x)$	0,035	0,080	0,218	0,471	0,805	0,985	0,99997	1
$x$	12,17	12,28	12,39	12,51	12,61	12,72	12,83	12,95

Проверка согласия экспериментальных и теоретических функций распределения с помощью критерия Пирсона [Л. 10] заключается в вычислении величины

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(d_i - nq_i)^2}{nq_i},$$

где  $d_i = n f_i$ ,  $q_i = F(x_{i+1}) - F(x_i)$ ,  $n$  — число проведенных наблюдений;  $k$  — число интервалов группировки.

Вычисленное значение  $\chi^2$  сравнивается со значением  $\chi_\alpha^2$ , которое выбирается из таблиц в зависимости от числа степеней свободы  $\nu$  (числа наблюдений) и выбираемого уровня значимости  $\alpha$ . В разбираемом случае число наблюдений достаточно велико ( $n = 120$ ), поэтому величину  $\chi_\alpha^2$  рассчитывают по формуле

$$\chi_\alpha^2 = \nu \left( 1 - \frac{2}{9\nu} + z_\alpha \sqrt{\frac{2}{9\nu}} \right)^3, \quad \nu = n - 2.$$

Величина  $z_\alpha$  приведена в таблицах для выбираемого уровня значимости  $\alpha$ . Принимаем  $\alpha = 0,95$ , следовательно,  $z_\alpha = 1,64$ . Тогда

$$\chi_\alpha^2 = 144,3.$$

Проверка согласия экспериментальных и теоретических функций распределения с помощью критерия Пирсона приведена в табл. 2-16.

Т а б л и ц а 2-16

$x_i$	$F(x_i)$	$q_i$	$f_i$	$f_i - q_i$	$(f_i - q_i)/q_i$
12,2	0,035	0,035	0,0083	-0,0267	0,0203697
12,3	0,099	0,055	0,0833	0,0283	0,01497174
12,4	0,218	0,128	0,0667	-0,0613	0,02942982
12,5	0,471	0,253	0,4833	0,2303	0,2093719
12,6	0,805	0,334	0,1333	-0,2007	0,1208525
12,7	0,985	0,180	0,1333	-0,0467	0,0175675
12,8	0,99997	0,01497	0,025	0,01003	0,0059682
$\Sigma = 0,41272061$					

Полученное значение  $\chi^2 = 49,53$  указывает на близкое соответствие построенного распределения эмпирическому.

Наконец, можно получить квантильные оценки изучаемых случайных величин с помощью построенных распределений Вейбулла.

Как известно [Л. 51]

$$M = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad D = a^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right], \quad (2-23)$$

где  $\Gamma$  — гамма-функция.

Подставляя найденные значения параметров  $a$  и  $b$ , находим:

$$M = 12,65 \cdot \Gamma(1 + 0,0093) = 12,58;$$

$$D = (12,65)^2 [\Gamma(1,0185) - \Gamma^2(1,0093)] = 0,025.$$

Нахождение доверительных границ связано с вычислением величины

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2-24)$$

где

$$y_i = x_i^b.$$

Для сгруппированных данных  $\bar{y}$  можно вычислять по формуле

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n f_i y_i.$$

Вычисления приведены в табл. 2-17.

Т а б л и ц а 2-17

$x_i$	$u_i$	$bu_i$	$y_i$	$f_i$	$f_i y_i$
12,2	1,0864	117,114	$0,013 \cdot 10^{119}$	0,0083	$0,0001079 \cdot 10^{119}$
12,3	1,0899	117,491	$0,03097 \cdot 10^{119}$	0,0833	$0,0025798 \cdot 10^{119}$
12,4	1,0934	117,868	$0,07379 \cdot 10^{119}$	0,0667	$0,00492179 \cdot 10^{119}$
12,5	1,0969	118,246	$0,1762 \cdot 10^{119}$	0,4833	$0,0851575 \cdot 10^{119}$
12,6	1,1004	118,623	$0,4298 \cdot 10^{119}$	0,1333	$0,05595934 \cdot 10^{119}$
12,7	1,1038	118,990	$0,9772 \cdot 10^{119}$	0,1333	$0,13026076 \cdot 10^{119}$
12,8	1,2072	119,356	$2,27 \cdot 10^{119}$	0,025	$0,05675 \cdot 10^{119}$
12,9	1,1106	119,723	$5,284 \cdot 10^{119}$	0,0667	$0,3524428 \cdot 10^{119}$

$$\bar{y} = 0,68818 \cdot 10^{119}$$

$$\lg \bar{y} = 118,8377$$

$$\lg a_0 = 1,102$$

$$a_0 = 12,65$$

После того как вычислено  $\bar{y}$ , находим  $a_0$ :

$$a_0 = \sqrt[b]{\bar{y}},$$

а доверительные границы — нижняя  $a_n$  и верхняя  $a_b$  — определяются с помощью коэффициентов  $r_1$ ,  $r_3$ , которые задаются в таблицах [Л.51] в зависимости от уровня значимости и числа степеней свободы:

$$a_n = \sqrt[b]{r_3 \bar{y}}; \quad a_b = \sqrt[b]{r_1 \bar{y}}. \quad (2-25)$$

Поскольку математическое ожидание случайной величины (2-23), распределенной по закону Вейбулла, определяется через параметры, а верхняя и нижняя границы параметра  $a$  определены формулами (2-25), доверительный интервал для среднего значения

$$x_n = a_n \Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right); \quad x_b = a_b \Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right),$$

так что

$$x_n < \bar{x} < x_b$$

с достоверностью статистического вывода  $\alpha$  (выбранный уровень значимости).

В нашем случае при уровне значимости  $\alpha = 95\%$  и числе измерений  $n = 120$   $r_1 = 1$ , 20;  $r_3 = 0,87$ .

Результаты расчетов следующие:  $\bar{y}=0,688 \cdot 10^{19}$ ;  $\lg \bar{y}=118,8377$ ;  $\lg r_1=0,0792$ ;  $\lg r_3=-0,0605$ ;  $\lg (r_1 \bar{y})=118,9169$ ;  $\lg (r_3 \bar{y})=118,7772$ ;  $\lg a_n=1,1031252$ ;  $\lg a_n=1,1018293$ ;  $a_n=12,68$ ;  $a_n=12,64$ ;  $\Gamma(1,0093)=0,9943$ ;  $\bar{x}_n=12,6077$ ;  $\bar{x}_n=12,5679$ .

Итак, среднее значение сопротивления изоляции рассматриваемых проводов лежит в пределах  $3,70 \cdot 10^{12}$ — $4,05 \cdot 10^{12}$  ом·м при достоверности статистического вывода 95%.

### 2-3. Электрическое сопротивление токопроводящих жил

Электрическое сопротивление токопроводящих жил является важнейшей характеристикой монтажных проводов. В зависимости от величины этого параметра выбирается сечение токопроводящих жил проводов, что в основном и определяет массу монтажных трактов в любой аппаратуре.

Практически сечение токоведущих жил выбирают по допустимому падению напряжения, которое при прочих равных условиях зависит от величины электрического сопротивления жилы:

$$\Delta U = RI, \quad (2-26)$$

где  $\Delta U$ , в;  $I$  — ток, а;  $R$  — электрическое сопротивление жилы, ом/м;  $l$  — длина тракта, выполненного монтажным проводом, м.

Изменение сопротивления токопроводящих жил монтажных проводов производится в соответствии с ГОСТ 7229-67 с помощью одинарных или двойных мостов постоянного тока.

Как правило, величина сопротивления токопроводящих жил оказывается весьма стабильной, а распределение значений этой величины подчиняется нормальному закону.

В табл. 2-18 приведены статистические параметры этих распределений.

Используя приведенные в табл. 2-18 данные, произведем расчет оптимального объема выборки для прове-

Таблица 2-18

Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Параметры распределения			Максимальное значение $R$ по ГОСТ 1956-70, ом/м
	$\bar{R}$ , ом/м	$\sigma$	$c$	
0,03	0,480	0,036	0,075	0,57
0,5	0,035	0,0016	0,0456	0,039
1,5	0,0118	0,00008	0,00675	0,012

дения измерения электрического сопротивления токоведущих жил монтажных проводов. Указанная задача в общем виде решена в гл. 1. Поскольку в этом случае мы имеем дело с односторонним (ограниченным сверху) интервалом, его верхняя граница может быть определена из формулы (1-10) как

$$R_{\text{макс}} = \bar{R} + \sigma \left( \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{N}} + t_P \sqrt{\frac{N-1}{\chi^2_2}} \right). \quad (2-27)$$

Результаты расчета при достоверности  $\alpha=0,9$  и надежности оценки  $P=0,99$  ( $t_P=2,64$ ) приведены в табл. 2-19.

Таблица 2-19

N	$t_{\alpha}$	$\chi^2_2$	$R_{\text{макс}}$ для сечений токоведущих жил, мм <sup>2</sup>		
			0,03	0,5	1,5
3	2,35	7,81	0,5772	0,03932	0,012016
5	2,02	11,1	0,570	0,0390	0,0120
7	1,90	14,1	0,568	0,03890	0,011996
10	1,81	18,3	0,567	0,03880	0,011993
30	1,70	43,8	—	—	0,011993

Таким образом, оптимальный объем выборки для проведения измерений электрического сопротивления токоведущих жил монтажных проводов составляет пять образцов.

## 2-4. Помехозащищенность

Помехозащищенность  $A_3$  электрических цепей в аппаратуре характеризуется отношением мощности полезного сигнала  $P_c$  в цепи к мощности помех  $P_{\Pi}$ :

$$A_3 = \frac{1}{2} \ln \frac{P_c}{P_{\Pi}}, \text{ неп.} \quad (2-28)$$

Электрические цепи в аппаратуре, как правило, выполняются монтажными проводами, объединенными в жгуты или кабели. Источниками помех могут быть как взаимное влияние соседних электрических цепей в жгуте (кабеле) за счет явления перехода энергии с одной цепи на другую, так и внешние источники электромагнитного поля (радиостанции, искрящие контакты, промышленные линии высокого напряжения и т. д.).

Такое разделение источников помех имеет условный характер, поскольку и в том и в другом случае помехи обусловлены взаимодействием сторонних электромагнитных полей с подверженной влиянию электрической цепью. Тем не менее методологически такое разделение удобно. Оно позволяет классифицировать и разрабатывать методы защиты от мешающих воздействий в зависимости от характера источников помехонесущего поля.

## а) Взаимное влияние цепей

Наиболее вероятный интервал рабочих частот полезных сигналов, используемый в аппаратуре, ограничен сверху частотой от 250 кГц до 10 МГц.

Учитывая, что длина электрических цепей обычно не превышает 10 м, для частоты 250 кГц — 10 МГц следует считать цепи электрически короткими. Тогда изменением тока и напряжением вдоль проводов можно пренебречь и рассматривать систему «влияющая цепь — цепь, подверженная влиянию» как эквивалентный четырехполюсник паразитной связи, включенный между влияющей и подверженной влиянию цепью.

В реальном жгуте имеют место также влияния через третьи цепи и обратные влияния цепей. Поэтому следовало бы исходить из теории шестиполюсных или восьмиполюсных цепей. Однако принятое упрощение существенно облегчает анализ и для качественного рассмотрения физического процесса влияния между цепями вполне оправданно [Л. 16, 24, 45, 50].

В общем случае эквивалентный четырехполюсник связи может быть несимметричным. Тогда

$$A_3 = \ln \frac{U_1}{U_2} - \frac{1}{2} \ln \frac{z_{a1}}{z_{a2}}, \quad (2-29)$$

где  $U_1$  — напряжение на входе влияющей цепи;  $U_2$  — напряжение помех в подверженной влиянию цепи;  $z_{a1}$ ,  $z_{a2}$  — модули электрических сопротивлений эквивалентного четырехполюсника, равные волновым сопротивлениям цепей.

Будем считать для простоты электрические параметры цепей одинаковыми. Обе электрические цепи замкнуты на одинаковую нагрузку, и их волновые сопротивления равны.

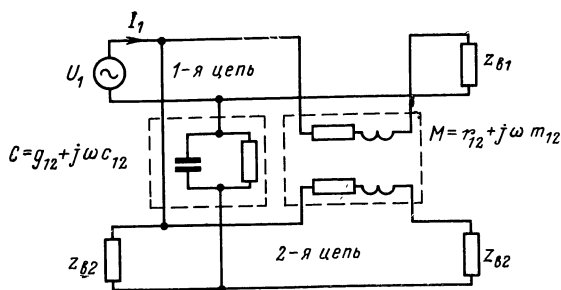


Рис. 2-10. Эквивалентный четырехполюсник связи.

Эквивалентный четырехполюсник связи характеризуется электрической и магнитной связью (рис. 2-10).

Электрическая связь  $C$  определяется отношением тока помех  $I_2$  к напряжению  $U_1$ :

$$C = \frac{I_2}{U_1} = g_{12} + j\omega c_{12}. \quad (2-30)$$

Магнитная связь  $M$  определяется отношением э. д. с. помех  $E_2$ , взятой с обратным знаком, к току во влияющей цепи  $I_1$ :

$$M = -\frac{E_2}{I_1} = r_{12} + j\omega m_{12}. \quad (2-31)$$

Суммарный ток помех в цепи 2 при нагрузке в цепи, равной волновому сопротивлению линии, будет:

$$I_2 = I_{2C} \pm I_{2M} = \frac{I_1}{2} \left[ (g_{12} + j\omega c_{12}) z_{\text{в}} \pm \frac{r_{12} + j\omega m_{12}}{z_{\text{в}}} \right], \quad (2-32)$$

где  $g_{12}$  — активная электрическая связь;  $c_{12}$  — емкостная связь;  $r_{12}$  — активная магнитная связь;  $m_{12}$  — индуктивная связь.

Параметры  $g_{12}$ ,  $c_{12}$ ,  $r_{12}$ ,  $m_{12}$  носят название первичных параметров влияния.

Электрическая связь  $C$  появляется в результате асимметрии частичных емкостей и диэлектрических потерь в изоляции проводов влияющей и подверженной влиянию цепей.

Частичные емкости  $c_{13}$ — $c_{14}$  и составляющие активной емкостной связи (потери в диэлектрике)  $g_{13}$ — $g_{24}$  образуют мост емкостной связи (рис. 2-11,а).



Условие равновесия моста емкостной связи, при котором перехода энергии во вторую цепь не будет, определяется соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} c_{12} &= (c_{13} + c_{24}) - (c_{14} + c_{23}) = 0; \\ g_{12} &= (g_{13} + g_{24}) - (g_{14} + g_{23}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2-33)$$

Потерями в диэлектрике при рабочих частотах можно пренебречь и считать, что электрическая связь (коэффи-

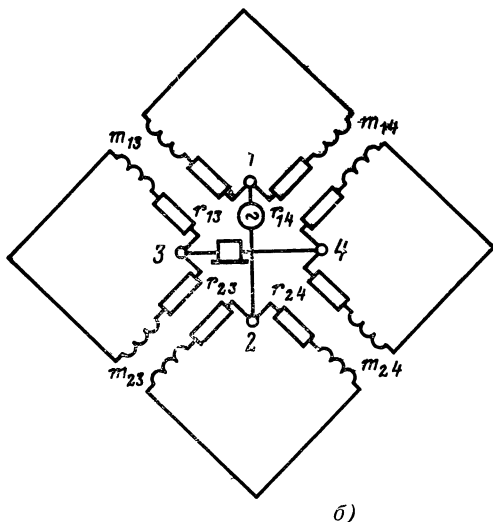
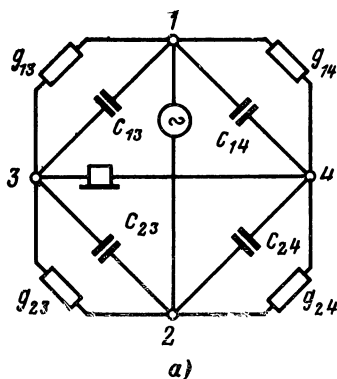


Рис. 2-11. Мост емкостной (а) и индуктивной (б) связи.

циент емкостной связи)  $C = c_{12}$ . Аналогично схемой замещения можно представить индуктивную составляющую магнитной связи.

Из схемы следует:

$$\dot{E}_{34} = -j\omega I_1 (m_{14} + m_{23} - m_{13} - m_{24}) = -j\omega I_1 M_{12}, \quad (2-34)$$

где  $I_1$  — ток влияющей цепи;  $m_{14} - m_{24}$  — частичные индуктивности цепей;  $E_{34}$  — э. д. с. помех.

Условие равновесия моста частичных индуктивностей (рис. 2-11, б)

$$(m_{14} + m_{23}) - (m_{13} + m_{24}) = 0. \quad (2-35)$$

Активная составляющая магнитной связи (гальваническая связь  $r$ ) обусловлена различным сопротивлением токопроводящих жил цепей переменному току, а также несимметричным расположением жил одной цепи относительно жил другой цепи и экранов.

Для гальванической связи аналогичным путем может быть получено

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

и условие отсутствия помех за счет нее:

$$(r_{14} + r_{23}) - (r_{13} + r_{24}) = 0. \quad (2-36)$$

Рассмотренная схема взаимного влияния двух цепей отражает качественную сторону процесса.

В реальных условиях для большого количества цепей процесс их взаимного влияния значительно усложняется. Однако очевидно, что для уменьшения взаимных влияний следует уменьшить разбаланс «моста» связей, т. е. обеспечить электрическую симметрию по частичным емкостным, активным, индуктивным и гальваническим связям.

Методы обеспечения электрической симметрии по частичным связям, разработанные для кабелей и линий связи, рассмотрены в [Л. 16, 24, 50]. Наиболее широкое распространение в технике связи получили способы уменьшения взаимных влияний путем скрещивания цепей; включения симметрирующих конденсаторов, централизованное симметрирование с применением элементов противосвязи.

Применение этих методов предполагает значительную протяженность линий связи и отсутствие жестких огра-

ничений по массе и габаритам кабельной сети. В обычной радиоэлектронной аппаратуре эти методы не применимы. Симметрирование по первичным параметрам влияния в жгутах производится за счет применения экранированных проводов и за счет выбора конструкции жгута, обеспечивающей геометрическую симметрию взаимовлияющих цепей.

Для низких (тональных) частот до 3—5 *кГц* величина взаимного влияния цепей в жгуте определяется в основном коэффициентом электрической связи. В первом приближении для уменьшения взаимных влияний в диапазоне тональных частот достаточно провести симметрирование цепей в жгуте только по емкостным связям. Методологически оказывается удобным производить симметрирование цепей таким образом, чтобы емкости проводов в жгуте относительно друг друга и земли были по возможности одинаковыми (например, за счет применения экранированных проводов).

При небольшом числе неэкранированных проводов в жгуте (до 28) эффективна парная или четверочная скрутка проводов. Скручивание не только стабилизирует взаимное расположение жил, но и ставит обе жилы цепи в одинаковые условия по отношению к внешним источникам помех. Путем подбора шагов и направления скрутки можно добиться минимальной разности емкости каждого провода электрической цепи по отношению к проводам соседних цепей.

Применение общих электростатических экранов для групп проводов, объединенных в двойки и четверки, увеличивает эффект симметрирования.

Для высоких частот существенную роль начинают играть электромагнитные связи.

Для уменьшения электромагнитной связи в жгутах применяют экранированные провода. Экраны должны быть электромагнитными. Обычно это оплетки из медной проволоки. Для уменьшения гальванической связи (за счет асимметрии потерь), в жгуте применяют экранированные провода одной марки и сечения. В случае применения неэкранированных проводов (например, если требование минимальных массы и габаритов проводной сети является доминирующим) электромагнитное влияние может быть снижено путем скрутки взаимовлияющих цепей в пары и четверки так же, как и для уменьшения емкостной связи.

В табл. 2-20 приведены примеры типовых конструкций жгутов и величины измеренных значений переходных затуханий для двух симметричных взаимовлияющих цепей.

Степень симметричности конструкции жгутов (табл. 2-20) оценена с помощью коэффициента емкостной связи.

Конструкция  $19 \times 0,05$  состоит из 19 одиночных проводов типа ФД-100 сечением  $0,05 \text{ мм}^2$ . Рабочие цепи могут быть составлены из двух любых проводов. Конструкция  $12 \times (2 \times 0,05)$  состоит из 24 одиночных проводов типа ФД-100 сечением  $0,05 \text{ мм}^2$ . Рабочие цепи объединены в скрученные экранированные пары. Конструкция  $12 \times (2 \times 0,05)$  та же, но пары не экранированные. Конструкция  $7 \times (4 \times 0,05)$  состоит из 28 одиночных проводов сечением  $0,05 \text{ мм}^2$  объединенных в скрученные четверки, каждая из которых заключена в общий экран. Конструкция  $7 \times (4 \times 0,05)$  аналогична предыдущей, но четверки не экранированные.

Одиночные провода в конструкции № 1 ( $19 \times 0,05$ ) обозначены арабскими цифрами от 1 до 19. При измерении из четырех любых проводов формировались влияющая цепь (например, из проводов 1 и 4) и цепь, подверженная влиянию (например, из проводов 2 и 5). Этому случаю в таблице соответствует условное обозначение 1-4/2-5.

В конструкциях № 2 и 3 рабочие цепи (скрученные в пары провода) обозначены римскими цифрами от I до XII. Если влияющая цепь I, а подверженная влиянию цепь II, то в табл. 2-20 этому случаю соответствует условное обозначение I/II.

В конструкциях № 4 и 5 римскими цифрами от I до VII обозначены скрученные четверки. Провода в каждой четверке обозначены по часовой стрелке арабскими цифрами от 1 до 4.

Условное обозначение (1-4) II (1-4) III означает, что влияющая цепь образована проводами 1 и 4 в четверке II, а подверженная влиянию — соответственно проводами 1 и 4 в четверке III.

Измерения переходного затухания производились при нагрузке  $500 \text{ ом}$  на приборе ВИЗ-2, а измерение коэффициента емкостной связи — на приборе ИЕД-4.

Данные, приведенные в табл. 2-20, показывают, что критерий помехозащищенности при взаимных влияниях между электрическими цепями в аппаратуре может относиться только к конструкции жгута (кабеля, проводной сети аппаратуры). По отношению к отдельному проводу понятие «помехозащищенность» обычно не применимо.

Тем не менее проблема уменьшения влияния между цепями продолжает интересовать не только конструкторов аппаратуры, но и изготовителей проводов, поскольку от конструкции провода в определенной мере зависит успех предпринимаемых конструкторами аппаратуры усилий по выработке эффективных методов защиты электрических цепей в жгутах от помех. При этом наилучшая помехозащищенность обеспечивается применением

Таблица 2-20

Номер конструкции	Условное обозначение конструкции жгута	Условное обозначение цепей влияющей и поддерживаемой влиянию	Величина переходного затухания, <i>нел</i> , при частоте сигнала, <i>кГц</i>						Коэффициент емкостной связи влияющей и поддерживаемой цепей
			15	50	100	150	200	250	
1	19×0,05	1-4/2-5	6,1	5,1	4,4	4,1	4	4	—30
		2-3/4-5	7,8	6,7	6,0	5,7	5,4	5,2	—350
		2-5/3-4	6,7	5,5	4,8	4,5	4,2	4,0	305
		8-9/7-8	8,2	6,9	6,2	5,8	5,5	5,3	20
		6-9/7-8	5,9	4,7	4,1	4	4	4	350
		6-3/7-4	6,3	5,2	4,6	4,2	4,0	4	370
		6-5/7-4	6,3	5,2	4,6	4,2	4,0	4	350
2	12×(2× ×0,05)э	I/II	11,1	9,7	9,0	8,7	8,4	8,2	0
		III/I	12,9	12,1	11,5	10,6	10,0	9,4	0
		IV/V	11,9	10,6	9,9	9,5	9,2	8,9	0
		IV/VI	13,1	11,7	11,2	10,7	10,5	10,3	0
		III/IV	16	15,0	14,1	13,5	13,1	12,8	0
		II/VII	16	15,6	15,0	14,7	14,3	14,0	0
3	12×(2× ×0,05)	I/II	9,9	8,7	8,0	7,6	7,4	7,1	0
		IV/V	10,5	9,6	8,9	8,5	8,0	7,9	—5
		IV/VI	11,3	10,0	9,3	8,9	8,5	8,2	0
		III/IV	12,8	11,3	10,5	10,1	9,8	9,5	—5
		II/VI	15,0	13,7	12,9	12,5	12,2	12,0	0
4	7×(4× ×0,05)э	(1-4) II (2-3) II	6,4	5,1	4,5	4,2	4,0	4,0	—525
		(1-2) II (3-4) II	12,3	10,8	10,3	9,9	9,7	9,4	0
		(1-4) I (1-4) II	12,3	11,0	10,3	10,0	9,7	9,6	0
		(1-2) I (1-4) II	11,3	10,0	9,4	9,1	8,8	8,7	0
		(1-4) II (1-4) III	14,8	13,3	12,5	12,1	11,8	11,6	0
		(1-2) II (1-4) IV	15,5	15,0	14,2	13,3	12,8	12,5	0
		(1-2) II (1-4) IV	16	14,1	12,9	12,4	12,0	11,7	0
5	7×(4× ×0,05)	(1-4) II (2-3) II	6,2	4,8	4,2	4,0	4	4	—710
		(1-2) II (3-4) II	12,9	11,7	11,0	10,7	10,4	10,2	0
		(1-4) I (1-4) II	12,5	11,5	10,7	10,4	10,2	10,0	0
		(1-2) I (1-4) II	11,6	10,4	9,8	9,5	9,2	9,0	0
		(1-4) II (1-4) III	12,9	11,6	11,0	10,6	10,3	10,1	0
		(1-2) II (1-4) III	13,3	12,0	11,3	11,0	10,7	10,5	0
		(1-4) II (1-4) IV	15,1	13,6	12,8	12,5	12,2	12,0	0
		(1-2) II (1-4) IV	14,2	12,9	12,2	11,8	11,5	11,3	0

отдельно экранированных проводов. Однако если требования минимальных массы и габаритов является критическим, то оптимальным решением может быть применение неэкранированных проводов с использованием методов симметрирования цепей в жгуте.

#### **б) Помехозащищенность при внешних источниках помех**

Источники внешнего помехонесущего поля могут быть точечными (коллекторные двигатели, искрящие контакты, лампы генераторов высокой частоты, и т. п.) и протяженными (протяженные линии высокого напряжения, импульсные кабели, провода зажигания и т. д.). Точечные источники вызывают поле, близкое к сферическому. Протяженные источники вызывают цилиндрическое помехонесущее поле.

Наиболее распространенный интервал частот помехонесущего поля в аппаратуре ограничен сверху частотой около 10 Мгц. В отдельных случаях частота помехонесущего поля может быть около 300 Мгц. Уменьшение напряжения помех в цепи в помехонесущем поле может быть произведено за счет:

удаления источника помех от проводов цепи, подверженной влиянию; практически это возможно редко;

формирования электрической цепи из двух скрученных между собой проводов. Поскольку величина э. д. с. помех наведенного в подверженной влиянию цепи определяется нормальной составляющей магнитного поля к плоскости петли, образованной этой цепью, э. д. с. помех на расстоянии шага скрутки меняет направление и происходит уменьшение суммарного напряжения помех за счет их взаимной компенсации;

применения электромагнитных экранов; при этом экранируются либо источники помех, либо подверженные помехам цепи, либо те и другие.

Наиболее радикальный способ подавления помех — применение электромагнитных экранов.

Действие экранов из немагнитных материалов основано на том, что переменное поле источника помех наводит в толще экрана вихревые токи. Вихревые токи, возникшие в экране, вызывают потери, в результате напряженность поля в экранированном пространстве уменьшается.

Действие экрана в переменном помехонесущем поле может быть оценено величиной коэффициента экраниро-

вания  $S$ , представляющей собой отношение напряженности электромагнитного поля в какой-либо точке пространства при наличии экрана ( $H_0$ ,  $E_0$ ) и без экрана ( $H_0$ ,  $E_0$ ):

$$S = \frac{H_0}{H_0} = \frac{E_0}{E_0}, \quad (2-37)$$

или величиной экранного затухания  $B = \ln |1/S|$ .

Рассмотрим частотную зависимость экранного затухания при разных соотношениях геометрических размеров цилиндрического экрана, приведенную Н. Каденом в [Л. 23]. По оси ординат будем откладывать не частоту,

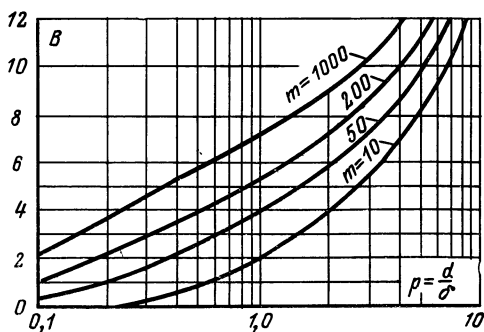


Рис. 2-12. Зависимость экранного затухания от частоты для цилиндрических экранов.

а зависимую от нее величину  $p = d/\delta$ , где  $d$  — толщина экрана;  $\delta$  — эквивалентная глубина проникновения поля (рис. 2-12).

Геометрические размеры экрана охарактеризуем величиной

$$m = R/d,$$

где  $R$  — радиус цилиндрического экрана.

Низкими обычно считаются частоты, при которых эквивалентная глубина проникновения поля  $\delta$  много больше толщины экрана  $d$ . При  $\delta \ll d$  частоты считаются высокими.

В этой области происходит вытеснение тока к поверхности экрана. На рис. 2-13 показана эквивалентная глубина проникновения для различных материалов. При низких частотах вытеснение тока практически ничтожно

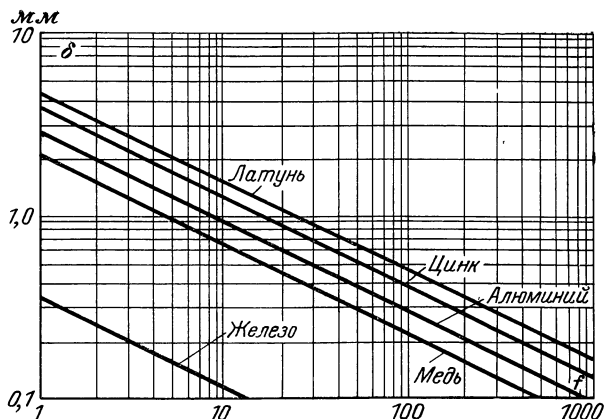


Рис. 2-13. Эквивалентная глубина проникновения в зависимости от частоты для различных металлов.

и экран может уподобляться короткозамкнутому витку, сопротивление которого совпадает с сопротивлением стенок трубы постоянному току.

Для сплошного цилиндрического экрана формулы для вычисления величины экранного затухания имеют следующий вид:

$$B = \frac{1}{2} \ln \left[ 1 + \left( \frac{Rd}{2\delta^2} \right)^2 \right] \quad (2-38)$$

для низких частот и

$$B = \frac{d}{\delta} \ln \frac{R}{4\sqrt{2}\delta} \quad (2-39)$$

для высоких частот.

Эти формулы применимы только к простейшему типу экрана — сплошной металлической трубе и представляют при определении экранирующих характеристики реальных экранов лишь методологическую ценность как первое приближение.

На рис. 2-14 приведены металлические оболочки со стыками в поперечном помехонесущем поле. Рассмотрим характеристики таких экранов для двух крайних случаев — экрана с аксиальными стыками и экрана с радиальными стыками (без зазора). Предполагается, что проводимость оболочки в месте стыков равна нулю.

Для экранов из меди можно считать, что экранирование происходит за счет токов, наведенных в стенках



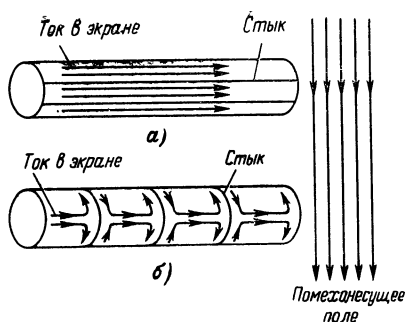


Рис. 2-14. Металлические оболочки со стыками в помехонесущем поле.

а — экран с аксиальными стыками;  
б — экран с радиальными стыками.

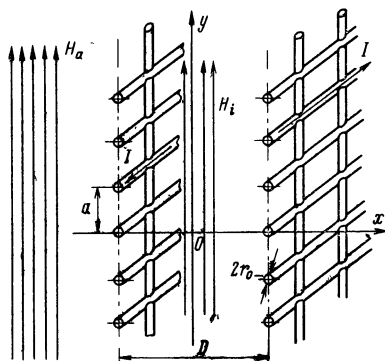


Рис. 2-15. Сетчатый экран в помехонесущем поле.

При более низких частотах, когда токами на стыках пренебречь нельзя, эффект экранирования будет ослаблен из-за появления компоненты искажающего поля, обусловленного токами на стыках. Выражение для коэффициента экранирования при этом становится более сложным.

Ниже приводятся формулы для расчета коэффициента экранирования сетчатых экранов (рис. 2-15), полученные Н. Каденом. Примем в соответствии с рис. 2-15

экранов переменным помехонесущим полем. Поле этих токов, взаимодействуя с полем помех, ослабляет его действие.

Очевидно, что аксиальные стыки (рис. 2-14, а) медных экранов при нулевом зазоре, не увеличивая сопротивления наведенным токам, не должны ухудшать экранирующих свойств при принятом направлении помехонесущего поля. Для этого случая справедливы формулы (2-38) и (2-39).

Иначе обстоит дело для случая, изображенного на рис. 2-14, б. При высоких частотах за счет эффекта вытеснения тока токи на стыках частично компенсируют друг друга. При дальнейшем увеличении частоты степень взаимной компенсации токов на стыках увеличивается и ими можно пренебречь. Тогда получим выражения, аналогичные формуле коэффициента экранирования для сплошного цилиндрического экрана.

следующие обозначения:  $D$  — расстояние между рядами проволок;  $r_0$  — радиус проволок;  $H_a$  — напряженность магнитного поля вне экрана;  $H_i$  — напряженность магнитного поля внутри экрана. Имеется в виду, что расстояния между проволоками экрана в рядах одинаковы.

Тогда коэффициент экранирования выразится формулой

$$\dot{S} = \frac{\dot{H}_i}{\dot{H}_a} = \frac{\frac{j\omega\mu_0}{\pi} \ln \frac{a}{2\pi r_i} + R_i}{j\omega\mu_0 \frac{D}{a} + R_i}, \quad (2-40)$$

где  $R_i$  — комплексное сопротивление проволок переменному току; при  $r_i < \delta$  (низкие частоты)  $R_i$  равно сопротивлению постоянного тока.

Сетчатый экран можно считать эквивалентным экрану со сплошными стенками толщиной  $d = 2r_i$  с проводимостью, уменьшенной в отношении коэффициента заполнения стенки экрана проволокой, равного  $\pi r_i : 2a$ .

Предельная величина коэффициента экранирования при частоте поля  $f \rightarrow \infty$  будет равна:

$$S_{\text{мин}} = \lim_{f \rightarrow \infty} S = \frac{a}{\pi D} \ln \frac{a}{2\pi r_i}. \quad (2-41)$$

При экстраполяции приведенных формул для цилиндрических сетчатых экранов достаточно заменить параметр  $D$  на соответствующий геометрический параметр цилиндрического экрана:

$$S_{\text{мин}} = \frac{2a}{\pi R_0} \ln \frac{a}{2\pi r_i}, \quad (2-42)$$

где  $R_0$  — радиус экрана.

Для электрического поля соответственно можно получить:

$$S = \frac{E_i}{E_a} \approx \frac{2a}{\pi R_0} \ln \frac{a}{2\pi r_i} \quad \text{для } R \gg a.$$

На практике для оценки сравнительного действия экранов различных конструкций эффективность замкнутых экранов часто оценивается величиной сопротивления связи. Особенно удобен этот метод оценки, когда экранируются помехонесущие цепи.

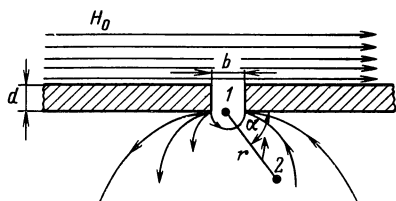


Рис. 2-16. Экран со щелью в магнитном поле.

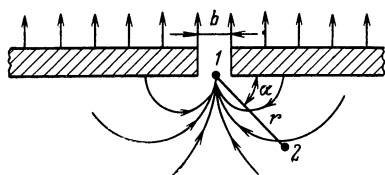


Рис. 2-17. Экран со щелью в электрическом поле.

Рассмотрим действие экрана со щелью в помехонесущем магнитном поле  $H_0$  (рис. 2-16). Величина  $H_0$  связана с помехонесущим током помех  $I$  соотношением

$$I = H_0 A,$$

где  $A$  — периметр экрана.

Помехонесущее магнитное поле  $H_0$  ослабляется действием экрана и вызывает в подверженной влиянию цепи напряжение помех  $U_0$ .

Величина сопротивления связи  $z_s$  определяется соотношением

$$z_s = U_0 / H_0 A = U_0 / I.$$

Очевидно, чем меньше величина сопротивления связи, тем выше экранирующая способность экрана.

Подробный вывод расчетных формул для этой задачи дан Н. Каденом [Л. 23]. Поэтому мы приводим здесь только результирующие формулы. Результаты расчета даны для магнитного и электрического полей.

Для экрана в магнитном поле при  $b \ll d$  в полярных координатах величина магнитного потенциала  $\varphi_m$  выражается формулой

$$\varphi_m(r, \alpha) = \left(\frac{2b}{\pi}\right)^2 \left[1 + (1 - j)(2 + \pi + \frac{\pi d}{b}) \frac{\delta}{b}\right] e^{-\left(\frac{\pi d}{b} + 2\right)} H_0 \frac{\cos \alpha}{r}. \quad (2-43)$$

Напряжение  $\dot{U}$ , наведенное в проводах 1 и 2, равно:

$$\dot{U} = j\omega\mu_0 \int_0^\alpha \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} r d\alpha = j\omega\mu_0 \left(\frac{2b}{\pi}\right)^2 \times \\ \times \left[1 + (1 - j)\left(2 + \pi + \frac{\pi d}{b}\right) \frac{\delta}{b}\right] e^{-\left(\frac{\pi d}{b} + 2\right)} H_0 \frac{\sin \alpha}{r}. \quad (2-44)$$

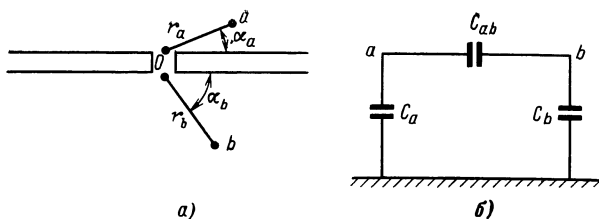


Рис. 2-18. К расчету частичной емкости.

Очевидно, что с увеличением частоты растет напряжение  $\dot{U}$ . С увеличением размера щели напряжение также должно возрасти. Помехонесущее поле  $H_0$  в частном случае может быть возбуждено током помех  $I$ , проходящим в стенках экрана.

Выражение для сопротивления связи в данном случае будет иметь вид:

$$Z_s = \frac{\dot{U}}{I} = \frac{\dot{U}}{2\pi R H_0} = \frac{j\omega \mu_0 b^2}{\pi^3 R^2} \times \\ \times \left[ 1 + (1 - j) \left( 2 + \pi + \frac{\pi d}{b} \right) \frac{\delta}{b} \right] e^{-\left( \frac{\pi d}{b} + 2 \right)}. \quad (2-45)$$

Рассмотрим плоский металлический экран со щелью, но теперь в однородном электрическом поле (рис. 2-17). По-прежнему полагаем  $b \leq d$ .

Запишем выражение потенциала  $\varphi_1$  этого поля для точки  $I$  внутри экрана:

$$\varphi_1(r, \alpha) = \left( \frac{2b}{\pi} \right)^2 E_0 e^{-\left( \frac{\pi d}{b} + 2 \right)} \sin \frac{\alpha}{r}, \quad (2-46)$$

где  $r$  и  $\alpha$  — полярные координаты точки  $I$ .

Начало координат расположено в середине щели, следовательно,

$$E = \text{grad } \varphi_1 = \left( \frac{2b}{\pi r} \right)^2 E_0 e^{-\left( \frac{\pi d}{b} + 2 \right)} \quad (2-47)$$

Произведем теперь расчет частичной емкости в соответствии со схемой замещения, изображенной на рис. 2-18.

Определим частичную емкость  $C_{ab}$  в соответствии со схемой замещения, изображенной на рис. 2-18:

$$\varphi_b = \varphi(r_b d_b) = \frac{C_{ab}}{C_b} \varphi_a,$$

где  $\varphi_a$  — потенциал провода или, в данном случае, напряжение между проводом и экраном;  $C_b$  — емкость между проводом и экраном.

Величина частичной емкости  $C_{ab}$  характеризует степень проникновения поля  $E_0$  сквозь отверстие.

Определяя частичную емкость  $C_{ab}$  в функции напряженности, получаем:

$$E_0 = \frac{C_a \varphi_a \sin \alpha_a}{\pi \epsilon_0 r_a}. \quad (2-48)$$

Из формул (2-47) и (2-48) получим:

$$C_{ab} = \left( \frac{2b}{\pi} \right)^2 e^{-\left( \frac{\pi d}{b} + 2 \right)} \frac{\sin \alpha_a \sin \alpha_b}{r_a r_b} \frac{C_a C_b}{\pi \epsilon_0}.$$

Для сплошного медного экрана — трубки толщиной  $t$  — можно для величины сопротивления связи получить формулу

$$Z_s = \frac{2k\rho e^{-t/\delta}}{\pi(D+t)} \left[ \cos \left( \frac{\pi}{4} - \frac{t}{\delta} \right) + j \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{t}{\delta} \right) \right]. \quad (2-49)$$

Величина сопротивления связи для этого случая и величина экранного затухания связаны соотношением

$$\dot{B} = \frac{\pi D z_s}{V j k \rho} \operatorname{th} \sqrt{2} k t. \quad (2-50)$$

Из соотношения (2-50) следует, что с уменьшением величины сопротивления связи увеличивается экранный эффект. Следует отметить, что связь величины  $z_s$  и  $B$  для экранов из проволок представляется более сложной и таким простым способом не может быть определена прежде всего потому, что аналитические выражения величин  $z_s$  и  $B$  для оплеток не получены.

Для сравнительной оценки однотипных конструкций экранов с одинаковыми геометрическими размерами (например, оценки эффективности экрана, выполненного в виде оплетки из медных проволок одинакового диаметра, но с неодинаковыми остальными конструктивными параметрами), их экранный эффект может быть оценен

наряду с величиной экранного затухания также и косвенным путем — величиной сопротивления связи для магнитного поля и величиной частичной емкости для электрического поля.

Таким образом, требуемая помехозащищенность электрических цепей в аппаратуре может быть обеспечена как конструкторами аппаратуры путем рационального выбора конструкции жгута (симметрирование цепей для уменьшения взаимных влияний в жгуте, формирование электрических цепей из скрученных между собой проводов и т. д.), так и изготовителями монтажных проводов путем рационального выбора конструкций экранов.

## в) Методы измерения помехозащищенности

Измерение взаимных влияний между цепями осуществляются двумя группами приборов: для измерения переходного затухания и для измерения активных и реактивных связей.

Измерения переходного затухания основаны на использовании метода сравнения. При этом затухание эквивалентного четырехполюсника связи сравнивается с затуханием магазинов затухания. Вместо магазинов затухания чаще используются делители напряжения или комбинации делителей напряжения и отдельных звеньев затухания. Обычная схема измерения переходного затухания приведена на рис. 2-19.

Сопротивления нагрузки подбираются обычно таким образом, чтобы они отличались не более чем на 50% от модуля волновых сопротивлений измеряемых линий. В качестве простейшего избирательного индикатора напряжения обычно используют телефон. Наиболее распространенный интервал частот измерения пе-

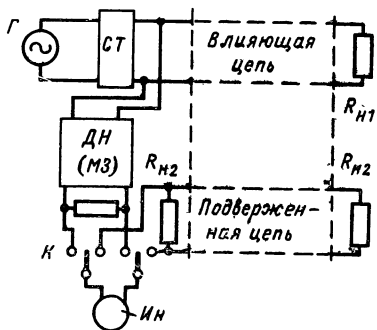


Рис. 2-19. Схема измерения переходного затухания.

СТ — симметрирующий трансформатор;  $R_H$  — согласованная нагрузка; ДН (МЗ) — делитель напряжения (магазин затухания); К — ключ; ИИ — индикатор.

реходных затуханий лежит в пределах 15—300 *кзц*, предел измерений 4—16 *нп*. Граница верхнего предела измерений определяется собственной помехозащищенностью прибора. Для совмещенного измерения симметричных и несимметричных схем используются дополнительные симметрирующие трансформаторы (приборы КИПС-300, ВИЗ-2А и др.).

Измерения составляющих электромагнитных связей между цепями основаны, как правило, на применении мостовых схем.

Измерители емкостных связей представляют собой емкостные мосты. Емкости двух или одного плеча образуют переменными калиброванными конденсаторами. Мосты снабжены также элементами для первоначальной балансировки моста по реактивным и остаточным активным составляющим сопротивлений. Генератор и индикатор напряжений подключаются к мосту через симметрирующие трансформаторы. Обычно измерения емкостных связей производятся при звуковых частотах.

Для измерения индуктивных и активных связей обычно применяются также мостовые схемы с фазовращателями. Рабочий диапазон частот таких схем охватывает частоты от 1 до 300 *кзц*.

В технике измерения кабелей связи при повышенных частотах применяются приборы, где одновременно осуществлены схемы для измерения всех видов связи [Л. 45].

Методы измерения экранного затухания и величины сопротивления свя-

зи разработаны и стандартизованы в основном применительно к радиочастотным кабелям. Однако эти методы с успехом могут использоваться для оценки эффективности и исследования конструкций экранов монтажных проводов и экранирующих оболочек жгутов и кабелей. Структурная схема одного из методов измерения экранного затухания экранов радиочастотных кабелей на низких ча-

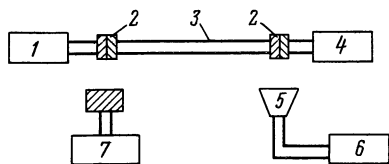


Рис. 2-20. Структурная схема измерения экранного затухания с помощью измерителей напряженности.

1 — генератор; 2 — высокочастотные соединители; 3 — исследуемый кабель; 4 — согласованная нагрузка; 5 — антенна-пробник; 6 — измерительный приемник; 7 — измеритель малых мощностей.

стотах приведена на рис. 2-20. Частотный диапазон измерений ограничен областью частот до  $1 \cdot 10^8$  гц.

К исследуемому образцу кабеля, концы которого заделаны высокочастотными соединителями, подключается генератор сигналов. К выходному концу кабеля присоединяется согласованная нагрузка. Чувствительным приемником с подключенной к нему антенной-пробником измеряют напряженность поля около кабеля. Зная величину напряженности в пространстве около кабеля, измеряют мощность в кабеле, оценивают величину экранного затухания:

$$B = 10 \ln \frac{P_k}{P_{пр}}, \quad (2-51)$$

где  $P_k$  — мощность в кабеле;  $P_{пр}$  — мощность, измеренная чувствительным приемником с антенной.

В качестве измерительного приемника могут быть использованы приемники типа ИП-6; ИП-7; ИП-8; ИП-9; ИМШ-1.

При использовании этого метода необходимо применять измерители малых мощностей с чувствительностью

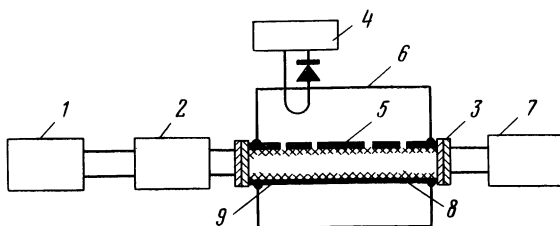


Рис. 2-21. Структурная схема измерения экранного затухания с помощью объемного резонатора.

1 — генератор; 2 — аттенюатор; 3 — высокочастотный соединитель; 4 — индикатор; 5 — полость резонатора; 6 — внешняя трубка; 7 — согласованная нагрузка; 8 — латунная трубка с отверстиями; 9 — экран исследуемого провода.

$10^{-12}$ — $10^{-15}$  вт в связи с тем, что стандартные генераторы сигналов обычно имеют выходную мощность примерно 1—2 вт.

Мощность  $P_{пр}$  представляет собой поток энергии, величина которого обусловлена эффективной поглощающей поверхностью антенны. Для строгого определения величины энергии, проникающей через экран, необходимо полученный результат проинтегрировать по поверхно-



сти цилиндра, охватывающей провод с некоторым радиусом  $r$  и длиной  $h$ , равной длине экрана. Для этого необходимо знать закон излучения оплетки, что существенно усложняет задачу. Вся схема должна быть защищена от влияния внешних помех. При работе со схемой нужно учитывать дополнительное излучение электромагнитной энергии в высокочастотных соединителях. Изложенное снижает возможности использования метода.

В основу метода измерения экранного затухания с помощью объемного резонатора положен принцип определения относительной величины поля, образующегося в прилегающем к проводу пространстве, при наличии экрана и без него. Для реализации этого принципа использованы свойства коаксиального волнового резонатора.

Структурная схема измерения экранного затухания с помощью объемного резонатора приведена на рис. 2-21. Проникающее через экран поле через отверстие в латунной трубке возбуждает в полости резонатора колебания. Частота сигнала должна соответствовать резонансной частоте резонатора. Образец провода в экране помещают внутрь трубки со щелями. К выходу образца подключают согласованную нагрузку. Изменяя частоту генератора, возбуждают резонатор. На градуированном аттенюаторе устанавливают коэффициент ослабления  $\alpha_1$ , при котором создается достаточная для уверенной индикации напряженность электромагнитного поля. Отмечают показания индикатора в максимуме резонансной кривой резонатора. После этого снимают экран с провода и повторяют индикацию. В этом случае показания индикатора будут существенно выше. Изменяя уставку затухания в калиброванном аттенюаторе, добиваются той же самой величины показания индикаторного прибора. Экранное затухание

$$B = (\alpha_2 - \alpha_1), \quad (2-52)$$

где  $\alpha_2$  — уставка калиброванного аттенюатора.

Мощность генератора сигналов при измерении должна оставаться постоянной.

Индикатором поля обычно служит микроамперметр постоянного тока либо измерительный усилитель типа 28-И, включенный в цепь детектора и петли связи. Частоты, в пределах которых обычно производятся измерения экранного затухания по этому методу, заключены в интервале от 300 до 1 000 Мгц.

Геометрические размеры резонаторов определяются из соотношения

$$f = nc/2l, \text{ гц,}$$

где  $c$  — скорость распространения электромагнитной энергии в воздухе ( $3 \cdot 10^{10}$  см/сек);  $l$  — длина резонатора, см;  $n=1, 2, 3 \dots$

Этот метод измерения обеспечивает более стабильные результаты. Однако следует учитывать, что он предусматривает равенство добротностей резонатора для случаев индикации поля при наличии экрана и без него.

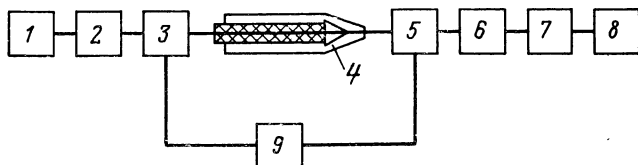


Рис. 2-22. Структурная схема измерения экранного затухания с помощью триаксиальной линии.

1 — генератор; 2, 6 — аттенюаторы развязки; 3, 5 — переключатели; 4 — измерительное устройство, 7 — детектор; 8 — индикатор; 9 — аттенюатор калиброванный

Опыт работы с объемными резонаторами показал, что добротность резонатора выше при наличии экрана на измеряемом образце, поскольку добротность резонатора зависит от степени его связи с возбуждающей цепью.

При работе с объемными резонаторами необходимо принимать меры по тщательному согласованию входа резонатора с цепью питания или вводить поправки в зависимости от величины коэффициента стоячей волны на входе резонатора. Погрешность метода 1—2 дБ.

Структурная схема измерения экранного затухания с помощью триаксиальной линии приведена на рис. 2-22. Внутренний конец экранированного провода заканчивается согласованным сопротивлением, величина которого численно равна волновому сопротивлению провода. В процессе измерения частота генератора сигнала варьируется до тех пор, пока напряжение индикатора не достигнет максимального значения. Величина затухания определяется методом сравнения с помощью калиброванного аттенюатора затухания.

Измерение величины сопротивления связи производят также с помощью триаксиальных линий (рис. 2-23). Образец экранированного провода длиной  $l$  помещается в центре сплошной металлической (латунной или медной) трубы 2. Экран 3 и токопроводящая жила провода 1 на одном конце замкнуты накоротко. Если приложить на противоположном (разомкнутом) конце образца напряжение  $U_1$ , то по внутренней коаксиальной системе (токопроводящая жила — экран) будет проходить ток  $I_1$ .

Во внешней системе, образованной экраном 3 провода и трубой 2, наведется напряжение  $U_2$ . Тогда величина сопротивления связи  $z_s$  определяется из соотношения

$z_s = U_2/I_1 l$ . При измерениях по этому методу необходимо, чтобы длина образца была меньше четверти длины волны напряжения  $U_2$ .

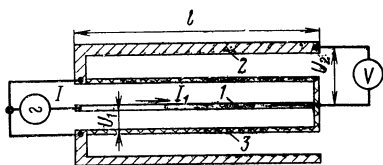


Рис. 2-23. Схема измерения величины сопротивления связи с помощью триаксиальной линии.

В основу всех методов экспериментального определения величины сопротивления связи для кабельных экранов, отличающихся друг от друга лишь способами индикации и типом связи триаксиальной линии и генератора, положена принципиальная схема (рис. 2-24).

Линия рассчитана на диапазон измерений до 50 МГц. Установка состоит из четырех основных узлов: источника высокочастотного напряжения 1, индикатора высокочастотного тока 2, собственно триаксиальной линии 3 с образцом измеряемого провода 5 и нагрузкой 6, индикатора наведенного напряжения 4.

Ток  $I_1$  измеряется на входе триаксиальной линии. На противоположном конце измеряемый образец замкнут на сопротивление, равное волновому сопротивлению кабеля. Для измерений при частоте до 10 МГц наличие сопротивления на конце не обязательно.

Измерения величины сопротивления связи, проведенные П. Крюгелем [Л. 38], производились на коаксиальных кабелях, замкнутых накоротко. При этом была обнаружена хорошая сходимость с результатами измерения на образцах, замкнутых на сопротивление, равное волновому сопротивлению кабеля.

Напряжение  $U_2$  измеряется на открытом конце внешней цепи триаксиальной линии. В качестве источника напряжения могут быть использованы стандартные генераторы типа 100-И и ГЗ-12. Измерение тока может производиться с помощью лампового миллиамперметра Т-13 с вакуумным бесконтактным преобразователем.

Современные методы измерения экранного затухания и величины сопротивления связи базируются на почти одинаковых триаксиальных линиях. Измерение производится практически одинаково. Определяется отношение

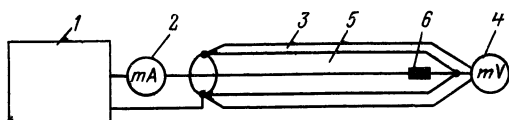


Рис. 2-24. Структурная схема триаксиальной линии для измерения величины сопротивления связи.

измеренных напряжений на выходе и входе измерительного устройства. Следует отметить, что оба метода обеспечивают лишь сравнительные измерения, так как полученные результаты зависят не только от параметра экрана, но и от конкретной конструкции устройств и типа индикатора.

В табл. 2-21 приведены результаты измерений экранного затухания  $B$  и сопротивления связи  $z_s$  оплеток различных конструкций на триаксиальной линии длиной 0,5 м с внутренним диаметром 42 и 19 мм, полученные инж. М. Ф. Поповым.

Таблица 2-21

Параметры оплетки		Величина экранного затухания, дБ		Величина сопротивления связи Мом/м		Примечание
Угол	Плотность, %	Линия Ø 42 мм	Линия Ø 19 мм	Линия Ø 42 мм	Линия Ø 19 мм	
30	90	33	29	520	520	Частота при измерении $B_s$ — 328 — — 349 Мгц Частота при измерении $z_s$ — 30 кгц
50	94	63	58	25	25	
61	77	45	38	135	135	
70	93	41	34	185	185	

Из таблицы видно, что величина сопротивления связи одинакова при различных диаметрах линии, а величина экранного затухания — разная. Поэтому при оценке эффективности экранов в виде проволоочных оплеток, особенно при выборе их конструктивных параметров, отдают предпочтение методу измерения сопротивления связи.

В гл. 11 приведены результаты исследования экранов монтажных проводов с использованием именно этой схемы измерения, как наиболее простой и удобной в эксплуатации.

Выше было показано, что степень проникновения электрического поля сквозь негерметичный экран может быть оценена величиной частичной емкости. Однако величина частичной емкости зависит от взаимного расположения электродов при измерении. Поэтому удобнее оценивать степень проникновения электрического поля сквозь экран со щелями по величине относительной емкости проницаемости.

Если  $C_0$  — емкость экранированного провода с экраном со щелями, например оплеткой, а  $C$  — емкость экранированного провода с герметичным экраном, выполненным в виде сплошной медной трубки, то соотношение  $(1 - C_0/C)$  будет характеризовать степень проникновения электрического поля сквозь экран-оплетку. При этом предполагается, что конструкция и геометрические размеры провода в первом и втором случаях идентичны.

Величина относительной емкостной проницаемости может быть выражена в процентах:

$$K = (1 - C_0/C) \cdot 100, \%$$

Поскольку при постоянном значении величины диэлектрической проницаемости изоляции провода величина емкости практически не зависит от частоты, коэффициент емкостной проницаемости может быть измерен обычным методом (методом сравнения, на мостовых схемах и т. д.).

Опыт экспериментального исследования экранных характеристик медных оплеток — экранов монтажных проводов показал, что для сравнительной оценки экранов однотипных конструкций (например, оплеток с одинаковым диаметром из одного материала) удобнее пользоваться измерением величины сопротивления связи и коэффициента емкостной проницаемости. Эти методы

незаменимы при экспериментальном выборе оптимальных параметров оплетки при большом объеме измерений.

Полученные результаты обычно отличаются высокой стабильностью. При этом оценка экранов с помощью этих методов должна производиться для однотипных экранов идентичной принципиальной конструкции с одинаковыми геометрическими размерами (например, могут сравниваться оплетки из медных проволок на проводах одного и того же диаметра или обмотки фольгой с разным шагом, но из одного материала и на проводах одного и того же диаметра и т. д.).

Методы непосредственного измерения экранного затухания отличаются более сложной техникой эксперимента и измерительной аппаратурой. Они могут быть использованы для оптимального выбора материала экрана и сравнительной оценки конструкций экранов с различными геометрическими размерами. Применительно к экранам монтажных проводов эти методы используются при выборе конструкции оплеток с заданной величиной экранного затухания.

## **Глава третья**

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

#### **3-1. Гибкость**

В связи с миниатюризацией радиоэлектронной аппаратуры и необходимостью производить сложный монтаж в ограниченных объемах весьма актуальным становится вопрос о степени гибкости проводов, используемых для монтажа. Во многих случаях повышенная гибкость проводов имеет решающее значение при выборе типа провода для аппаратуры. Гибкость провода интересует потребителя главным образом с точки зрения удобства монтажа (более гибкий провод легче укладывать в схему, набирать, рихтовать и укладывать жгуты и т. д.). Однако в некоторых случаях гибкость провода приобретает и другое значение. Речь идет о проводах, соединяющих подвижные относительно друг друга элементы аппаратуры и создающих дополнительный момент сопротивления движению элементов. Естественно, чем гибче провода, применяемые для таких соединений, тем мень-

ше момент сопротивления, создаваемый ими. Все это дает основание считать гибкость одним из важных параметров монтажных проводов. Итак, гибкость провода характеризуется усилием, необходимым для изгиба его на определенный радиус. Величина, обратная гибкости, называется жесткостью. В простейшем случае монтажный провод представляет собой комбинированную конструкцию, состоящую из токопроводящей жилы и слоя изоляции. Жесткость такой конструкции равна сумме жесткостей ее элементов:

$$B_{\text{пр}} = B_{\text{ж}} + B_{\text{из}}. \quad (3-1)$$

Следовательно, гибкость провода можно определить по формуле

$$F_{\text{пр}} = \frac{1}{B_{\text{пр}}} = \frac{1}{B_{\text{ж}} + B_{\text{из}}} = \frac{F_{\text{ж}} F_{\text{из}}}{F_{\text{ж}} + F_{\text{из}}}. \quad (3-2)$$

Для проводов с круглой однопроволочной токопроводящей жилой гибкость легко определяется расчетным путем по заданным геометрическим размерам и величинам модулей упругости применяемых материалов:

$$F_{\text{ж}} = \frac{1}{E_{\text{ж}} J_{\text{ж}}} = \frac{1}{0,05 d^4 E_{\text{ж}}}; \quad (3-3)$$

$$F_{\text{из}} = \frac{1}{E_{\text{из}} J_{\text{из}}} = \frac{1}{0,05 (D^4 - d^4) E_{\text{из}}}, \quad (3-4)$$

где  $E_{\text{ж}}$  и  $E_{\text{из}}$  — соответственно модули упругости материала жилы и изоляции;  $J_{\text{ж}}$  и  $J_{\text{из}}$  — моменты инерции сечений жилы и слоя изоляции;  $d$  — диаметр токопроводящей жилы;  $D$  — наружный диаметр провода.

Значения модулей упругости основных проводниковых и изоляционных материалов, применяемых в монтажных проводах, приведены ниже.

Наименование материала	Модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>
Медь мягкая (отожженная) . . . . .	10 800
Кремнийорганическая резина . . . . .	30—60
Поливинилхлоридный пластикат . . . . .	100—200
Полиэтилен низкой плотности . . . . .	1 500
Полиэтилен высокой плотности . . . . .	7 000
Политетрафторэтилен . . . . .	7 000
Фторированный этиленпропилен . . . . .	12 000

Определение гибкости проводов с многопроволочной жилой является более сложным вопросом, так как надо учитывать возможность перемещения проволок друг друга относительно. Оценку гибкости таких проводов обычно производят экспериментальным путем.

В мировой практике существует несколько методов определения гибкости многопроволочных токопроводящих жил проводов в целом. Однако большинство из них позволяет давать только качественную (сравнительную) оценку гибкости разных конструкций.

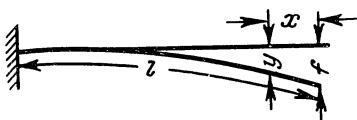


Рис. 3-1. Принципиальная схема измерения гибкости.

Наиболее объективной является методика измерения гибкости, изложенная К. Лохером в Бюллетене Швейцарского союза электротехников, 1958 г. Эта методика предусматривает определение гибкости токопроводящих жил проводов, сводящееся с некоторыми допущениями к известной задаче определения гибкости стержня длиной  $l$  и массой  $P$ . Исходным уравнением принято уравнение гибкого стержня (рис. 3-1).

$$y''(x) = \frac{P}{2lEJ} x^2. \quad (3-5)$$

Дважды интегрируя уравнение (3-5) от 0 до  $l$ , получаем:

$$y(x) = \frac{P}{24lEJ} (x^4 - 4l^3x + 3l^4). \quad (3-6)$$

Максимальный прогиб стержня будет при  $x=0$

$$f_{\text{макс}} = \frac{Pl^3}{8EJ}, \quad (3-7)$$

откуда

$$f = \frac{1}{EJ} = \frac{8f_{\text{макс}}}{gl^4}, \quad (3-8)$$

где  $g = P/l$ .

Учитывая, что токопроводящие жилы провода могут иметь некоторый начальный изгиб, выражение (3-8) уточняют с помощью коэффициентов:

$$F = \frac{kf_{\text{макс}}}{gl^{\alpha}}, \quad (3-9)$$



где  $k$  — коэффициент размерности, равный  $1 \cdot 10^5$ ;  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, равный 3,6—4,0, определяемый путем замеров прогибов  $f_1$  и  $f_2$  отрезков провода разной длины ( $l_1$  и  $l_2$ ) по формуле

$$\alpha = \frac{1g \frac{f_1}{f_2}}{1g \frac{l_1}{l_2}}. \quad (3-10)$$

Формулы (3-9) и (3-10) справедливы при длительно-сти проведения эксперимента  $\tau \rightarrow \infty$ . Однако на практике удовлетворительные результаты получаются при времени испытания, равном 3—5 мин.

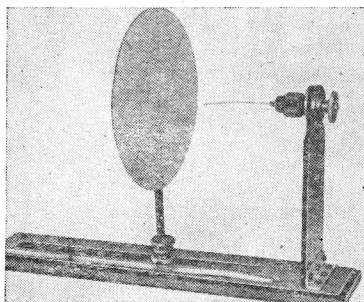


Рис. 3-2. Прибор для измерения гибкости.

Прибор для измерения гибкости (рис. 3-2) состоит из подставки и зажимной головки (типа токарного патрона), которая может поворачиваться на  $360^\circ$  вокруг горизонтальной оси. Прогиб образцов измеряется с помощью масштабной линейки, укрепленной на подставке.

Поскольку образцы до измерений имеют некоторый прогиб, то необходимо измерять их в четырех или, лучше, в восьми положениях зажимной головки. Измерения производят следующим образом: образец жилы помещают в зажимную головку в горизонтальном положении и по истечении 3—5 мин замеряют прогиб  $f_1$  (отклонение конца провода от горизонтальной оси). Затем головку поворачивают на  $45^\circ$  и замеряют прогиб  $f_2$  и т. д. Необходимо заметить, что при первоначально изогнутых образцах могут быть отрицательные значения прогиба. Среднее значение прогиба  $f_{\text{макс}}$  определяется по формуле

$$f_{\text{макс}} = \frac{\sum_{i=1}^8 f_i}{n}. \quad (3-11)$$

Длина образца измеряется без учета участка, зажатого в головке.

Ниже приводится пример расчета гибкости токопроводящей жилы, состоящей из 18 проволок диаметром 0,5 мм (по результатам измерений)

Длина образца, см . . . . .	30	27	25	22	19
Прогиб $f_{\text{макс}}$ , см (среднее из восьми измерений) . . . . .	6,25	4,22	3,19	1,99	1,14
Масса единицы длины, г/см . . . . .	0,316				

Величина коэффициента  $\alpha$  определяется по (3-10):

$$\alpha = \frac{\lg \frac{6,25}{1,14}}{\lg \frac{30}{19}} = 3,75.$$

Гибкость жилы определяется по (3-9):

$$F = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 6,25}{0,316 \cdot 30^{3,75}} = 3,7 \text{ 1/кгс} \cdot \text{см}^2.$$

При экспериментальной проверке этой методики выяснилось, что стабильность результатов испытаний для определенных групп сечений токопроводящих жил в значительной степени зависит от длины испытуемых образцов. С целью повышения стабильности результатов измерений был определен оптимальный диапазон длин образцов в зависимости от их сечений. В качестве критерия принималось минимальное значение коэффициента вариации

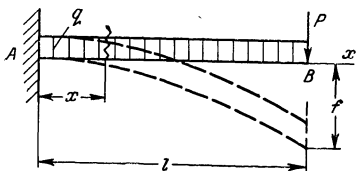


Рис. 3-3. Принципиальная схема измерения гибкости.

$$c = \sigma / \bar{f}_{\text{ср}}, \quad (3-12)$$

где  $\bar{f}_{\text{ср}}$  — средневзвешенное значение максимального прогиба;  $\sigma$  — стандартное отклонение.

Рекомендации по оптимальным длинам образцов для измерений гибкости по изложенной выше методике приведены ниже:

Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	0,20—0,35	0,5—0,75	1,0—2,5
Оптимальная длина образца, см . .	5—10	15—20	25—30

Тем не менее даже с приведенными выше уточнениями описанная методика остается достаточно трудоем-

кой, так как для определения гибкости одной конструкции необходимо произвести не менее 40 замеров (5 образцов при 8 положениях зажимной головки). Однако небольшие изменения схемы измерений дают возможность существенно упростить процесс испытаний. Согласно схеме, приведенной на рис. 3-3 (консольная балка с сосредоточенным на конце грузом) максимальный прогиб образца можно определить по формуле

$$f_{\text{макс}} = \frac{l^3 (8P + 3gl)}{24EJ}, \quad (3-13)$$

откуда гибкость образца

$$F = \frac{1}{EJ} = \frac{24f}{l^3 (8P + 3gl)}. \quad (3-14)$$

Введя коэффициент размерности ( $k = 1,25 \cdot 10^4$ ), получим:

$$F = \frac{3 \cdot 10^5 f}{l^3 (8P + 3gl)}. \quad (3-15)$$

Если подобрать массу  $P$  такой, чтобы при снятии нагрузки конец образца возвращался в исходное положение, то необходимое число замеров сокращается (5 вместо 40). Контрольные измерения гибкости токопроводящих жил и проводов, проведенные с помощью новой методики, показали достаточно близкую сходимость экспериментальных и расчетных данных (табл. 3-1).

Таблица 3-1

Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Конструкция токопроводящих жил	Тип изоляции	Толщина изоляции, мм	Гибкость, 1/(кгс·см <sup>2</sup> )	
				экспериментальное значение	расчетное значение
0,20	7×0,20	Без изоляции	—	230	—
0,20	7×0,20	Поливинилхлоридный пластикат	0,2	218	213
0,20	7×0,20	Полиэтилен низкой плотности	0,2	217	201
0,20	7×0,20	Полиэтилен высокой плотности	0,2	160	142
0,5	7×0,30	Без изоляции	—	38	—
0,5	7×0,30	Поливинилхлоридный пластикат	0,3	32	28
0,5	7×0,30	Полиэтилен высокой плотности	0,3	14,3	14,7
1,5	19×0,32	Без изоляции	—	7,2	—
1,5	19×0,32	Поливинилхлоридный пластикат	0,3	6,7	5,4
1,5	19×0,32	Полиэтилен низкой плотности	0,3	5,0	5,2
1,5	19×0,32	Полиэтилен высокой плотности	0,5	2,0	3,3

Однако имеется достаточно большая группа проводов, для которых описанные выше методики не пригодны. Речь идет об особо гибких монтажных проводах с изоляцией из кремнийорганической резины, а также о проводах весьма малых сечений ( $0,03—0,05 \text{ мм}^2$ ) с другими видами изоляции. Такие провода, закрепленные с одного конца, свободно опадают, что практически не дает возможности измерить величину прогиба.

Для определения гибкости особо гибких проводов предложен метод [Л. 32], схема реализации которого изображена на рис. 3-4. Отрезок гибкого провода помещается на

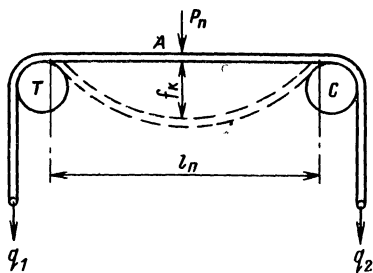


Рис. 3-4. Схема измерения гибкости особо гибких проводов.

на цилиндрические опоры, и к концам его крепятся грузы  $q_1$  и  $q_2$ , которые натягивают провод и не дают ему прогибаться под действием собственной массы. Измерение гибкости производится путем замера прогиба  $f$  под действием силы  $P_n$ . Расчетные формулы выводятся так же, как и в предыдущих случаях с учетом нагрузок  $q_1$  и  $q_2$ . Пусть  $B$  — жесткость провода;  $B_n$  — жесткость системы «провод — грузы»;  $B_0 = B_n - B$  — условная величина, характеризующая изменение жесткости провода под действием нагрузок  $q_1$  и  $q_2$ . Величина  $B_n$  определяется экспериментально. Следовательно, для определения жесткости (или гибкости) провода необходимо найти  $B_0$ . Эта задача может быть решена путем моделирования абсолютно гибкого провода, жесткость которого близка к нулю. Действительно, при  $B_0 = 0$ :

$$B = B_n. \quad (3-16)$$

Такое моделирование можно осуществить путем испытания предложенным методом нерастяжимой тонкой нити при условии, что ее диаметр несоизмеримо меньше расстояния между опорами. Тогда жесткость провода можно выразить формулой

$$B = B_n - B_0 = \frac{1}{48} \left( \frac{P_n l_n^3}{f_n} - \frac{P_0 l_0^3}{f_0} \right). \quad (3-17)$$

Формула (3-17) дает решение задачи в общем виде. Если задать  $f_{\pi} = f_0$  и  $l_{\pi} = l_0$ , то она может быть существенно упрощена:

$$B = \frac{l_{\pi}^3}{48f_{\pi}} (P_{\pi} - P_0). \quad (3-18)$$

Дальнейшее упрощение этой формулы можно произвести, рассмотрев условия работы конкретной установки (рис. 3-5). Провод  $A$  при помощи винтовых зажимов  $1$  и  $2$  закрепляется на опорах  $T$  и  $C$ , представляющих собой блоки, свободно вращающиеся вокруг горизонтальных осей. При прогибании провода на блоки наматываются гибкие нерастяжимые нити  $4$  и  $5$ , на концах которых подвешены грузы  $q_1$  и  $q_2$ . Радиусы блоков равны между собой, поэтому величины усилий, прикладываемых

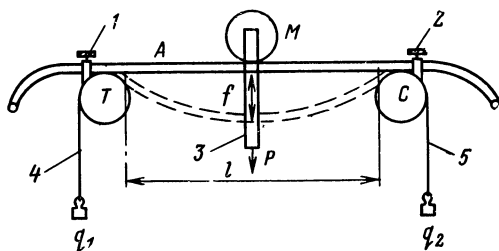


Рис. 3-5. Принципиальная схема измерения гибкости.

$A$  — измеряемый провод;  $T$  и  $C$  — цилиндрические опоры;  $M$  — ролик подвижной системы;  $q_1$  и  $q_2$  — грузы;  $P$  — результирующий груз;  $1, 2$  — зажимы;  $3$  — подвижная система;  $4$  и  $5$  — нерастяжимые нити.

к точкам закрепления провода, не изменяются в процессе его прогибания. Прогибающая нагрузка  $P$  прикладывается к штанге  $3$ , в верхней части которой жестко закреплена горизонтальная ось. На этой оси свободно вращается ролик  $M$ . Ролик  $M$ , штанга  $3$  и другие детали подвижной системы имеют какую-то собственную массу, создающую постоянную начальную нагрузку  $P = \text{const}$ . Любая другая нагрузка на провод выразится соотношением

$$P = P_{\text{const}} + P_{\text{д}}, \quad (3-19)$$

где  $P_{\text{д}}$  — переменный дополнительный груз, величина которого зависит от гибкости провода и желаемой стрелы прогиба.

Если подобрать массу подвижной системы установки такой, чтобы при закреплении на блоках нерастяжимой гибкой нити без дополнительного груза  $P_d$  эта нить прогнулась на величину  $f_0$ , то

$$P_0 = P_{\text{const}}. \quad (3-20)$$

Тогда при заданном выше условии ( $f_{\text{п}} = f_0$ ) можно записать, что

$$P - P_0 = P_{\text{const}} + P_d - P_{\text{const}} = P_d \quad (3-21)$$

и уравнение (3-17) примет окончательный вид:

$$B = \frac{P_d l^3}{48f}. \quad (3-22)$$

Необходимо подчеркнуть, что формула (3-22) справедлива только в том случае, если измеряемый провод прогибается под действием груза  $P_d$  строго на такую же величину, на которую прогибается абсолютно гибкая нить под действием массы подвижной системы. Гибкость провода при предложенной методике определяется по формуле

$$F = \frac{48f}{P_d l^3}. \quad (3-23)$$

Применительно к конкретной установке, имеющей заданные параметры  $f$ ,  $l$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  и  $P_0$ , эта формула приобретает более простой вид:

$$F = C/P_0,$$

где  $C = 48f/l^3$  — постоянный коэффициент.

Как указывалось выше, при конструировании испытательных установок необходимо максимально приближать условия испытаний к условиям эксплуатации. В связи с этим рассмотрим характер изгиба проводов на предложенной установке. Под действием внешней нагрузки  $P$  провод изгибается по параболе, уравнение которой, как известно, имеет вид:

$$y = ax^2. \quad (3-24)$$

Для вершины параболы (точка приложения силы  $P$ )

$$a = 1/2 R, \quad (3-25)$$

где  $R$  — радиус ролика, м;

$$y = f \text{ и } x = l/2, \quad (3-26)$$

откуда

$$f = l^2/8R, \quad (3-27)$$

или

$$R = l^2 / 8f.$$

Поскольку величина радиуса эксплуатационных изгибов провода обычно кратна его диаметру, то выражение (3-27) удобнее представить в следующем виде:

$$kD = l^2 / 8f, \quad (3-28)$$

где  $D$  — диаметр провода;  $k = R/D$  — кратность изгиба.

Таким образом, зная заданную кратность изгиба провода, можно так подобрать параметры установки, чтобы при испытании провод прогибался на тот же радиус.

### 3-2. Стойкость к перегибам

В процессе монтажа аппаратуры провода неизбежно подвергаются многократным перегибам. Для значительной части проводов требования на стойкость к перегибам не ограничиваются монтажными изгибами. При экс-

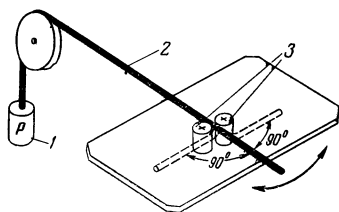


Рис. 3-6. Схема установки для испытаний монтажных проводов на стойкость к многократным перегибам.

1 — груз; 2 — жила; 3 — диски.

плуатации многократно изгибаются провода, которые соединяют элементы аппаратуры, перемещающиеся относительно друг друга; изгибам подвергаются провода при стыковке и расстыковке разъемов, а также провода, присоединяющие приборы, расположенные на крышках аппаратуры, при открывании или закрывании последних и т. д. Количественно стойкость монтажных проводов к многократным перегибам характеризуется допусти-

мым числом циклов изгиба с заданными углом, радиусом и частотой. Анализ требований потребителей показывает, что в процессе монтажа и эксплуатации провода чаще всего изгибаются на угол до  $\pm 90^\circ$  с кратностью не менее  $k=5$  и частотой не более 60 циклов в минуту.

Как правило, наиболее уязвимым конструктивным элементом монтажного провода с точки зрения стойкости к многократным перегибам является токопроводящая жила. Определение этого параметра для различных кон-

струкций токопроводящих жил производится на установке, показанной на рис. 3-6.

При испытаниях к свободному концу образца подвешивается груз  $P$ , обеспечивающий натяжение образца в процессе испытаний. В реальных условиях эксплуатации растягивающие нагрузки к проводу специально не прикладываются. Тем не менее провода, закрученные в жгут, при монтаже испытывают такие нагрузки за счет упругости жгута, взаимного трения проводов при изгибах и т. д.

Для испытаний оказывается целесообразным выбирать груз значительно большим, чем реальные растягивающие нагрузки. Это сокращает время испытаний и четко фиксирует разрушение жилы. Проволоки в жиле при многократных перегибах ломаются не одновременно, и по мере облома все большего количества проволок условия испытаний становятся все более жесткими, так как удельные нагрузки возрастают. Это явление сокращает время от начала разрушения жилы до ее полного обрыва. Наличие натяжения снижает ошибки эксперимента за счет так называемого плавающего контакта, что очень существенно. Таким образом, налицо задача о выборе оптимальных условий проведения эксперимента. Для решения этой задачи образцы жилы сечением  $0,5 \text{ мм}^2$ , скрученной из 49 проволок диаметром  $0,12 \text{ мм}$ , испытывались на установке, показанной на рис. 3-6 с разными значениями натягивающих грузов. Для каждого груза испытывалось по 50 образцов жилы, и затем подсчитывались значения математического ожидания, стандартного отклонения и коэффициента вариации (табл. 3-2).

Анализ данных, приведенных в табл. 3-2, показывает, что как и следовало ожидать, средняя величина числа перегибов с увеличением груза монотонно уменьшается.

Т а б л и ц а 3-2

Величина груза, $гс$	Количество двойных перегибов (среднее значение)	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации $C$
100	6 069	1 365	0,224
200	3 035	407	0,134
300	2 306	240	0,115
400	1 965	294	0,149
500	1 746	261	0,155
700	751	124	0,165



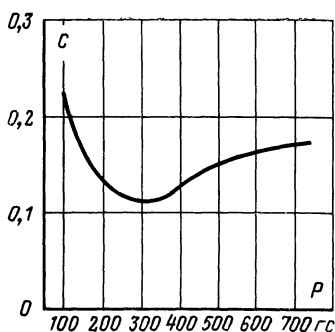


Рис. 3-7. Зависимость коэффициента вариаций от величины натягивающего груза.

случаях увеличивается разброс показаний. Для окончательного выбора оптимального груза при испытании проводов сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  на стойкость к перегибам необходимо было выяснить, является ли груз  $300 \text{ гс}$  оптимальным и для других конструкций токопроводящих жил того же сечения. С этой целью по описанной выше методике были испытаны образцы жил конструкций  $19 \times 0,18$  и  $7 \times 0,30$ . Результаты испытаний приведены на рис. 3-8.

Анализ графиков, приведенных на этом рисунке, показывает, что оптимальный груз для токопроводящих жил одного сечения — величина постоянная, не зависящая от конструкции жилы. Подобные же исследования были проведены и для токопроводящих жил других сечений (рис. 3-9).

В результате для каждого сечения выбраны оптимальные грузы для испытаний проводов на стойкость к перегибам. Эти величины приведены ниже:

Сечение токопроводящих жил, $\text{мм}^2$	0,03	0,05	0,08	0,12	0,20	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5
Оптимальный груз, гс	50	50	75	75	100	200	300	400	500	700

Что касается степени разброса показателей, которая характеризуется величиной коэффициента вариации, то этот параметр имеет явно выраженный минимум при грузе  $300 \text{ гс}$  (рис. 3-7).

Физический смысл такого распределения разброса показаний можно объяснить следующим образом: при малых грузах натяжение жилы вокруг роликов при изгибах недостаточно, при больших — повышаются динамические нагрузки на свободный конец жилы. В обоих

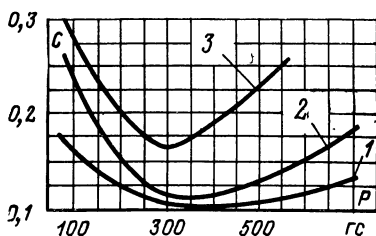


Рис. 3-8. Зависимости коэффициентов вариации от величины груза для жил разных конструкций.

1 —  $7 \times 0,30$ , 2 —  $19 \times 0,18$ , 3 —  $49 \times 0,12$ .

Оптимальный объем выборки для проведения испытаний токопроводящих жил на стойкость к многократным перегибам определялся из следующих условий: достоверность  $\alpha=0,9$ ; вероятность эффективного вывода (надежность оценки)  $P=0,99$ ; максимальный размах допустимых значений стойкости к перегибам не должен

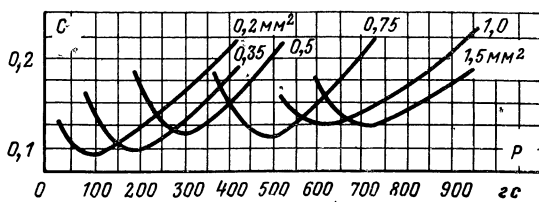


Рис. 3-9. Зависимости коэффициентов вариации от величины грузов для жил разных сечений.

превышать  $\pm 30\%$  от среднего значения.

Для решения поставленной задачи воспользуемся формулой

$$I_n(\alpha, P, n) = \bar{N} \pm \sigma \left( \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} + t_P \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_2}} \right) \quad (3-29)$$

и преобразуем ее:

$$I_n(\alpha, P, n) = \bar{N} \left[ 1 \pm C \left( \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} + t_P \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_2}} \right) \right].$$

Выполнение приведенных выше условий возможно при

$$C \left( \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} + t_P \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_2}} \right) \leq 0,3. \quad (3-30)$$

Решение этого неравенства приведено в табл. 3-3 (при  $C=0,12$ ).

Таблица 3-3

$n$	$t_\alpha$	$t_\alpha/\sqrt{n}$	$\sqrt{\chi^2_2}$	$\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_2}} t_P$	$C \left( \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} + t_P \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_2}} \right)$
3	2,920	1,63	2,45	1,52	0,378
5	2,130	0,90	3,05	1,71	0,313
10	1,833	0,58	4,02	1,96	0,305
20	1,729	0,38	5,51	2,08	0,298
30	1,699	0,31	6,42	2,15	0,295

Таким образом, оптимальный объем выборки для испытаний проводов на стойкость к перегибам составляет 15 образцов.

### 3-3. Стойкость к продавливающим нагрузкам

В процессе изготовления, монтажа и эксплуатации провода подвергаются воздействию продавливающих нагрузок. Ввиду разнообразия условий монтажа и эксплуатации величины этих нагрузок могут иметь различные значения. Следствием

воздействия продавливающих нагрузок могут явиться вмятины на изоляции проводов, снижающие ее толщину и приводящие к электрическому пробое. Поэтому одним из важнейших требований к монтажным проводам является требование по стойкости к продавливающим нагрузкам. Как правило, стойкость монтажных проводов к продавливанию определяется экспериментально путем испытания образцов на установках, имитирующих продавливающие нагрузки. В связи с этим

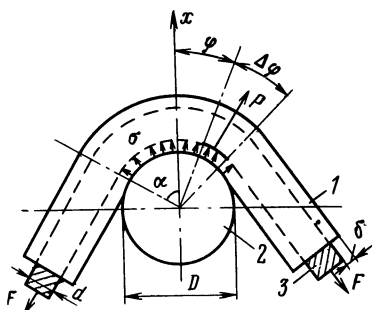


Рис. 3-10. Схема воздействия на провод продавливающей нагрузки.

большой интерес представляет возможность расчета величины продавливания в зависимости от материала и толщины изоляции. Такой расчет предложен в [Л. 19] Д. Н. Дикерманом и Г. А. Рывкиным и заключается в следующем.

Рассмотрим одну из распространенных схем воздействия на изоляцию провода продавливающих нагрузок (рис. 3-10). Провод 1 с толщиной изоляции  $\delta$  огибает стержень 2 диаметром  $D$ . Угол охвата  $2\alpha$ . К жиле 3 диаметром  $d$  приложена растягивающая нагрузка  $F$ . Под действием силы  $F$  жила стремится продавить изоляцию и сместиться по направлению, противоположному направлению оси  $x$ . Этому противодействует напряжение  $\sigma$ , возникающее в материале изоляции. Сумма проекций на ось  $x$  сил, действующих на жилу, равна 0:

$$\sum x_{\sigma} + \sum x_F = 0, \quad (3-31)$$

где  $x_{\sigma}$  — проекция на оси  $x$  сил, действующих на жилу из-за противодействия материала;  $x_F$  — проекция на ось  $x$  сил, действующих на жилу из-за наличия силы  $F$ .

Нетрудно показать, что

$$\sum x_F = -2F \cos(90 - \alpha). \quad (3-32)$$

Для определения  $\Sigma x_\sigma$  рассмотрим элементарный угол  $\Delta\varphi$  (рис. 3-10).

Тогда усилие, действующее на жилу, будет равно:

$$\Delta P = \sigma \Delta S,$$

где  $\Delta S$  — элементарная площадка поверхности жилы:

$$\Delta S \approx \frac{\pi}{2} d \Delta l = \frac{\pi}{2} d \left( \frac{D}{2} + \delta \right) \Delta\varphi. \quad (3-33)$$

Таким образом,

$$\Delta P = \frac{\pi}{2} \sigma d \left( \frac{D}{2} + \delta \right) \Delta\varphi. \quad (3-34)$$

При  $\Delta\varphi \rightarrow 0$  переходим к дифференциальной форме уравнения (3-34):

$$\partial P = \frac{\pi}{2} \sigma d \left( \frac{D}{2} + \delta \right) \partial\varphi. \quad (3-35)$$

Проекция силы  $\partial P$  на ось  $x$  равна:

$$\partial P_x = \frac{\pi}{2} \sigma d \left( \frac{D}{2} + \delta \right) \cos \varphi \partial\varphi. \quad (3-36)$$

$$\sum x_\sigma = \sum dP_x = 2 \int_{\varphi=0}^{\varphi=\alpha} \frac{\pi}{2} \sigma d \left( \frac{D}{2} + \delta \right) \cos \varphi d\varphi. \quad (3-37)$$

Считая, что  $\sigma$  не зависит от  $\varphi$ , подставляя в (3-31) слагаемые из уравнений (3-32) и (3-37) и интегрируя, получаем:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d (D + 2\delta)}. \quad (3-38)$$

Для проверки формулы (3-38) был проведен эксперимент по продавливанию макета провода: на жилу диаметром 1,8 мм надевалась трубка из полиэтилена толщиной 0,8 мм. Продавливание осуществлялось на специально оборудованной разрывной машине по схеме, показанной на рис. 3-11. Определялась нагрузка, при которой происходило полное продавливание изоляции (замыкание жилы со стержнем). Результаты эксперимента приведены в табл. 3-4.

Из табл. 3-4 видно, что отношение  $4F/(D+2\delta)$  остается практически постоянным; это свидетельствует о правильности описания механизма продавливания формулой (3-38). Аналогичные эксперименты, проведенные с жилами различных диаметров, показали, что продавливающая нагрузка, как это следует из формулы (3-38), пропорциональна диаметру жилы.

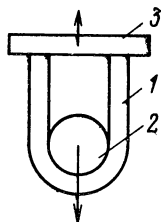


Рис. 3-11. Схема испытаний проводов на продавливание.

1 — провод; 2 — стержень; 3 — зажим разрывной машины.

Таблица 3-4

Диаметр стержня, мм	Продавливаю- щая нагрузка, кгс	$(D + 2\delta)$ , мм	$\frac{4F}{D+2\delta}$ , кгс/см
5	30	6,6	18,2
10	54	11,6	18,6
20	103	21,6	18,6
30	137	31,6	17,4

Формула (3-38) получена для круглой однопроволочной жилы, а величина продавливающей нагрузки зависит и от конструкции жилы. Поэтому эта формула должна быть уточнена следующим образом:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi dm(D + 2\delta)}, \quad (3-39)$$

где  $m$  — коэффициент, показывающий, во сколько раз продавливающая нагрузка при жиле данной конструкции больше, чем при однопроволочной жиле такого же диаметра. В табл. 3-5 приведены результаты эксперимента по определению коэффициента  $m$  (изоляция из полиэтилена высокой плотности толщиной 0,8 мм).

Для практических расчетов значение коэффициента  $m$  можно принять для семипроволочной конструкции жилы равным 1,2, а для девятнадцатипроволочной — 2,0.

Для расчетов продавливания по формуле (3-39) необходимо знать допустимые значения величины  $\sigma$  для каждого материала изоляции, а также выявить зависимость между  $\sigma$  и деформацией (уменьшением толщины) изоляции. С этой целью был сконструирован прибор, внешний вид которого показан на рис. 3-12.

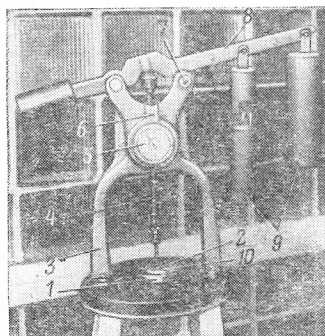


Рис. 3-12. Прибор для определения стойкости пластмасс к продавливанию.

На стойке 3 в направляющих 6 расположен шток 4, перемещающийся в вертикальном направлении. Шток опирается на продавливающий инструмент 2, образец материала 10 и подставку 1. Продавливающий инструмент представляет собой сменные цилиндры или шарики различных диаметров. Нагружение образца обеспечивается навешиванием на рычаг 8 с шарниром 7 грузов 9. Шток жестко связан с индикатором 5, по которому производится отсчет глубины погружения инструмента в образец. В процессе эксперимента снима-

Таблица 3-5

Конструкция жилы	Диаметр жилы, мм	Продавливающая нагрузка, кгс	$t$
1×1,5	1,5	56,8	1
7×0,5	1,5	70	1,24
19×0,30	1,5	120	2,1

лась временная зависимость глубины погружения инструмента в образец при различных нагрузках. Испытывались стандартные образцы (пластины) из полиэтилена высокой и низкой плотности, фторопласта 40Ш, фторопласта 4Д, полиамида 68 и др. толщиной от 0,5 до 2,0 мм. Результаты эксперимента приведены на рис. 3-13.

При приложении нагрузки инструмент, погружаясь в образец, встречает все большее сопротивление из-за увеличения площадей, входящих между собой в контакт. При этом к определенному моменту времени возможно два исхода.

а) при сравнительно малых удельных давлениях наступает равновесие сил давления и сопротивления материала, дальнейшее погружение инструмента прекращается;

б) при больших удельных давлениях после погружения инструмента на 1/2 диаметра полное продавливание образца неизбежно вне зависимости от его толщины и является только вопросом времени; при этом величина  $\sigma$  с этого момента и до конца эксперимента остается постоянной (поверхность соприкосновения инструмента и материала не увеличивается).

Удельное давление (напряжение)  $\sigma$ , возникающее в материале для цилиндрического инструмента, рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S_k} = \frac{F}{lL}, \quad (3-40)$$

где  $S_k$  — площадь контакта;  $L$  — длина цилиндрического инструмента;  $l$  — длина дуги цилиндра, находящейся в контакте с образцом.

Поскольку при каждом эксперименте  $F$  и  $l$  известны, а  $l$  определяется в зависимости от  $D$  и глубины погружения  $h$ , то можно рассчитать  $\sigma$  в зависимости от  $h$ . На рис. 3-14 представлены зависимости  $\sigma$  от  $h$  для различных материалов.

Для интересующей нас рабочей области эта зависимость в логарифмических координатах выражается прямыми линиями. Поэтому

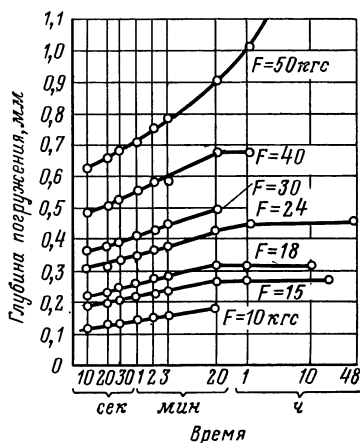


Рис. 3-13. Зависимость глубины погружения инструмента (шарик  $\varnothing$  5 мм) от времени при различной нагрузке  $F$ .

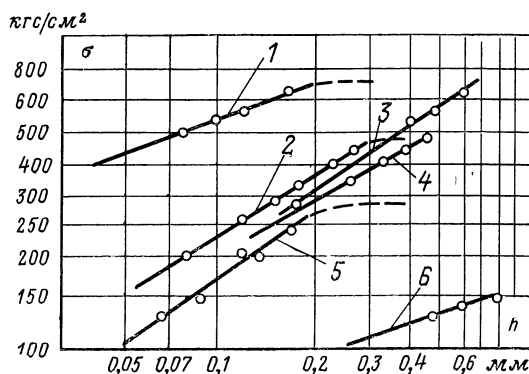


Рис. 3-14. Зависимость глубины погружения инструмента в образец от напряжения (время 20 мин).

1 — фторопласт 3Б; 2 — фторопласт 40; 3 — полиамид 68; 4 — фторопласт 30; 5 — поливинилхлорид; 6 — полиэтилен.

в общем виде зависимость глубины погружения от напряжения может быть записана как

$$\lg \sigma = \lg A + B \lg h \quad (3-41)$$

или

$$\sigma = Ah^B. \quad (3-42)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  для разных материалов приведены в табл. 3-6.

Таблица 3-6

Коэффициент	Полиэтилен низкой плотности	Полиэтилен высо- кой плотности	Полиамид 68	Фторопласт 40Ш
$A$	167	870	1 070	1 240
$B$	0,37	0,7	0,64	0,714

Сопоставив уравнения (3-39) и (3-42), получим:

$$Ah^B = \frac{4F}{\pi dm (D + 2\delta)}. \quad (3-43)$$

Уравнение (3-43) позволяет произвести полный расчет воздействия на провод продавливающих нагрузок. Оно связывает коэффициенты  $A$  и  $B$ , величины, характеризующие конструкцию провода  $d$ ,  $m$  и  $\delta$ , нагрузку  $F$ , диаметр стержня  $D$  и глубину продавливания  $h$ . По (3-43) на электронно-вычислительной машине были рассчитаны различные конструкции проводов и по результатам расчета построены номограммы, которые можно использовать для оценки продавливания (рис. 3-15).

Пример пользования номограммой приводится ниже. Пусть провод с однопроволочной ( $m=1,0$ ) жилой диаметром  $1,0 \text{ мм}$  с изоляцией из полиэтилена высокой плотности толщиной  $0,3 \text{ мм}$  изогнут вокруг цилиндра диаметром  $2,0 \text{ см}$ . Определить допустимую растягивающую нагрузку  $F$ , при которой величина продавливания не превысит  $0,1 \text{ мм}$ . Из номограммы на рис. 3-15,а величина

$$\frac{F}{D+2\delta} = 13,5,$$

откуда  $F=13,5 \cdot (2+2 \cdot 0,03) = 27,8 \text{ кгс}$ .

Выше оценивалась величина продавливания изоляции монтажных проводов при нормальных температурах. Однако наибольшую опасность представляют продавливающие нагрузки при одновременном воздействии

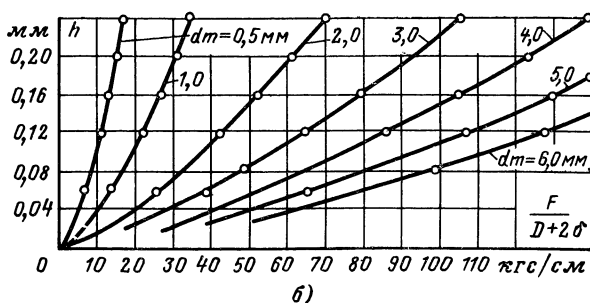
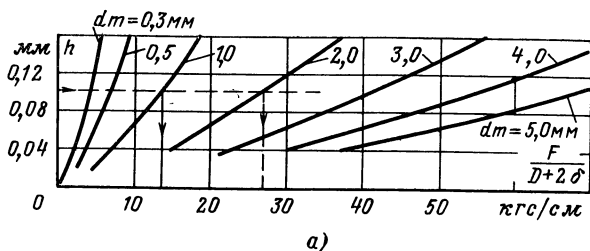


Рис. 3-15. Номограммы для расчета продавливающих нагрузок.

а — изоляция — полиэтилен; б — изоляция — фторопласт 40.

повышенных температур. Оценка работоспособности монтажных проводов при комплексном воздействии продавливающих нагрузок и повышенных температур рассматривается в гл. 4.



### 3-4. Стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам

В процессе эксплуатации монтажные провода, как и другие элементы аппаратуры, подвергаются воздействию вибрационных, ударных и линейных нагрузок. Испытания проводов на стойкость к этим воздействиям проводятся на стандартном испытательном оборудовании — вибрационных и ударных стендах и центрифугах. Методики этих испытаний обычно разрабатываются по аналогии с соответствующими методиками испытаний таких элементов, как реле, резисторы конденсаторы и т. д. Образцы проводов наматываются на стержни определенного диаметра, которые неподвижно крепятся к рабочим частям указанного испытательного оборудования.

Многолетняя практика таких испытаний показала, что монтажные провода всех типов обладают стойкостью к воздействию вибрационных, ударных и линейных нагрузок в полном объеме требований, предъявляемых к современной радиоэлектронной аппаратуре.

Однако данные по количеству отказов аппаратуры из-за неисправности монтажных проводов показывают, что большинство этих отказов происходит вследствие обрыва проводов в месте припаивания их к различным электроэлементам, причем количество таких отказов резко увеличивается, если провода монтируются в аппаратуре, подверженной ударам и вибрациям. Поэтому, помимо обычных испытаний проводов на стойкость к воздействию вибрационных, ударных и линейных нагрузок, необходимо проверять стойкость к вибрации в месте пайки.

При воздействии вибраций участок провода от места пайки до первого крепления совершает колебания, частота, амплитуда и направления которых зависят от многих не поддающихся учету факторов (длина участка, вес провода, частота и направление вибраций и т. д.). Однако ясно, что место пайки является относительно неподвижной точкой и что амплитуда колебаний будет наибольшей в случае, когда собственная частота колебаний участка провода совпадает с частотой вибраций.

Для оценки усталостной прочности жилы в месте пайки используется методика, имитирующая реальные условия эксплуатации провода. Образец провода длиной около 0,5 м зачищается и залуживается в ванне с оло-

вом при температуре  $+300^{\circ}\text{C}$  в течение 1—2 сек. Затем образец запаивается в штырь разъема (рис. 3-16).

Устройство для испытаний представляет собой зажим, укрепленный на столе вибростенда 1, и неподвижный блок 2 (рис. 3-17). Штырь с запаянным образцом укреп-

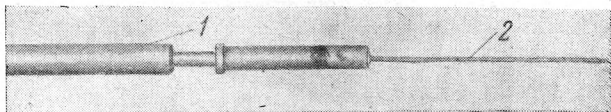


Рис. 3-16. Запаивание жилы в штырь разъема.

1 — штырь разъема; 2 — токопроводящая жила.

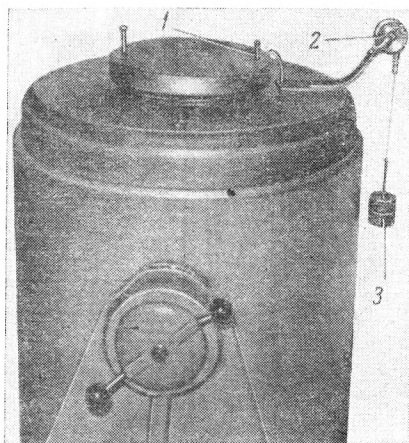


Рис. 3-17. Установка для испытаний токопроводящих жил на усталостную прочность в месте пайки.

ляется в зажиме, и свободный конец перебрасывается через блок и к нему подвешивается груз 3.

Испытания проводятся до обрыва жилы в месте пайки. Регулируемыми параметрами, влияющими на результаты испытаний, являются: частота вибрации  $f$ ,  $\text{гц}$ ; амплитуда вибрации  $A$ ,  $\text{мм}$ ; длина плеча  $l$ ,  $\text{мм}$  (расстояние от места пайки до блока); величина груза  $P$ ,  $\text{гс}$ .

Поскольку задачей исследований является получение сравнительных данных по усталостной прочности жил разных конструкций, то подбираются такие значения указанных параметров, при которых время испытаний было бы минимальным.

Исследование этого вопроса показало, что наиболее жесткие условия создаются при частоте порядка 30 гц. Предполагая заранее, что усталостная прочность в месте пайки однопроволочных жил существенно меньше, чем для многопроволочных, величина груза  $P$  для каждого сечения выбиралась таким образом, чтобы время испытания однопроволочных жил не превышало 30—60 сек. Оптимальные величины грузов приведены ниже:

Сечение, мм <sup>2</sup> . .	0,20	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5
Груз, гс . . . . .	300	700	1000	1000	1500	1500

Ввиду нестабильности процесса пайки жил объем выборки для всех сечений был принят равным 50 образцам. Как правило, распределение времени до обрыва

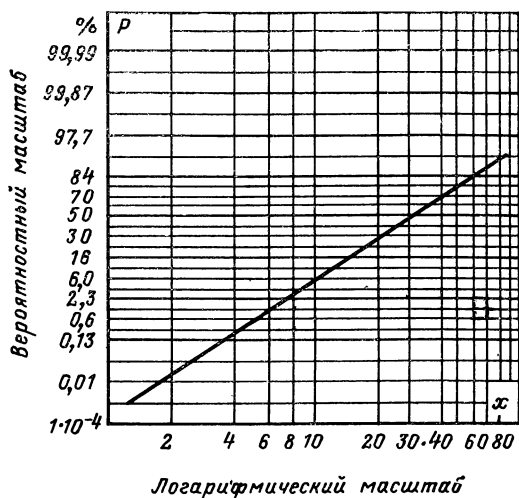


Рис. 3-18. Типичный график полигона накопленных частот распределения времени до обрыва жилы, построенный на логарифмической вероятностной бумаге.

жил при вибрациях подчиняется нормально-логарифмическому закону. Типичный график полигона накопленных частот распределения времени до обрыва жилы, построенный на логарифмической вероятностной бумаге, показан на рис. 3-18.

Для сравнительной оценки усталостной прочности токоведущих жил разных конструкций удобно пользоваться соотношением:

$$\tau'_{\text{мин}} = \bar{\tau} - t_p \sigma', \quad (3-44)$$

где  $\tau' = \lg \tau$  ( $\tau$  — время до обрыва жилы);  $t_p$  — квантиль нормального распределения, соответствующая принятой надежности оценки.

### 3-5. Стойкость к растягивающим нагрузкам

В процессе изготовления и монтажа провода подвергаются воздействию растягивающих нагрузок. В ряде случаев такие нагрузки имеют место и при эксплуатации проводов в аппаратуре. В связи с миниатюризацией элементов аппаратуры и использованием монтажных проводов очень малых сечений вопрос о допустимых растягивающих нагрузках становится весьма актуальным и в некоторых случаях решающим при выборе сечения провода для той или иной схемы.

Разрывная прочность проводов в основном определяется разрывной прочностью токопроводящей жилы.

При регламентировании максимально допустимых растягивающих усилий для монтажных проводов разных сечений необходимо иметь в виду, что характерной особенностью удлинения меди является малая величина предела текучести (4,2—4,9 кгс/мм<sup>2</sup>) и соответствующего ему удлинения (0,039—0,045%). При растяжении провода, а следовательно, и жилы за предел текучести в медных проволоках накапливается значительная остаточная деформация. Это явление может иметь весьма опасные последствия. При резких изменениях температуры, при ударных сжимающих нагрузках и некоторых других воздействиях происходит нарушение продольной устойчивости жилы. На жиле возникают изгибы синусоидальной формы (рис. 3-19), которые могут проколоть или продавить изоляцию.



Рис. 3-19. Внешний вид деформированной жилы.

После нескольких циклов указанных воздействий в изогнутом участке жилы возникают небольшие по-

перечные трещины, которые при дальнейших деформациях провода быстро приводят к излому жилы.

Поэтому, хотя разрывная прочность медной проволоки достаточно велика, максимально допустимые растягивающие нагрузки для проводов с медными жилами не должны превышать пределов текучести для этого материала.

Ориентировочно оценка допустимого значения растягивающего усилия может быть произведена по формуле:

$$P_{\text{доп}} \leq \sigma_{\text{т}} q k, \quad (3-45)$$

где  $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести;  $q$  — сечение токопроводящей жилы;  $k$  — коэффициент запаса.

На практике эту величину определяют экспериментально путем испытаний образцов проводов на стандартных разрывных машинах. С учетом диапазона сечений монтажных проводов наиболее целесообразно использовать машину с предельной нагрузкой 40 кгс.

## Глава четвертая

### КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 4-1. Нагревостойкость

##### а) Основные определения

В последнее время значительно возросла потребность в монтажных проводах повышенной нагревостойкости. Если сравнительно недавно все монтажные провода имели нагревостойкость, не превышающую 60—80 °С, то в настоящее время широко применяются провода, способные длительно эксплуатироваться при температуре 250—300 °С.

При этом имеется необходимость и в проводах с более высокой нагревостойкостью. Все это говорит о том, что нагревостойкость становится одним из основных технических параметров монтажных проводов, предназначенных для использования в радиоэлектронной аппаратуре.

Под нагревостойкостью монтажных проводов понимается их свойство сохранять работоспособность при длительном или кратковременном воздействии повышенной температуры. В соответствии с этим определением следует различать два вида нагревостойкости

монтажных проводов — длительную и кратковременную.

Ресурс монтажных проводов обычно принимается равным ресурсу радиоэлектронной аппаратуры, который, как правило, не превышает 10—20 тыс. ч. Таким образом, длительная нагревостойкость количественно оценивается только одним параметром — максимально допустимой температурой и в основном зависит от нагревостойкости материала изоляции.

В ряде современных устройств провода, как и вся остальная аппаратура, должны работать при очень высоких температурах. Однако ресурсы работы такой аппаратуры обычно небольшие (от нескольких минут до десятков, реже сотен часов). В связи с тем, что современная техника не располагает полимерными материалами, способными длительно без разрушений выдерживать температуру **свыше 300 °С**, появились провода, изоляция которых хотя и разрушается при высоких температурах, но относительно медленно (в течение заданного времени провод остается работоспособным). Кратковременная нагревостойкость характеризуется двумя параметрами: температурой и допустимым временем использования. Как правило, провода с повышенной кратковременной нагревостойкостью изготавливаются с комбинированной изоляцией (шелк — поливинилхлорид, стекло — фторопласт и т. д.), т. е. величина этого параметра существенно зависит от конструкции провода.

Метод определения нагревостойкости основывается на предположении, что в большинстве случаев зависи-

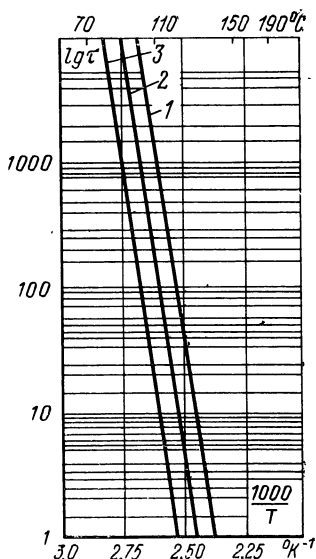


Рис. 4-1. Нагревостойкость поливинилхлоридного пластиката и провода на его основе.

1 — полюска из поливинилхлорида (критерий — снижение относительного удлинения при разрыве до 50%); 2 — полюска из поливинилхлорида (критерий — снижение хладостойкости до  $-40^{\circ}\text{C}$ ); 3 — провода с изоляцией из поливинилхлорида (критерий — испытательное напряжение  $U_{\text{исп}} = 2U_p$ ).

мость срока службы изоляционных материалов и конструкций от температуры описывается уравнением Ван Гоффа — Аррениуса

$$\tau = T_{\infty} e^{-E/RT}, \quad (4-1)$$

где  $R = 1,987 \text{ кал}/(\text{°C} \cdot \text{моль})$  — универсальная газовая постоянная;  $E$  — энергия активации,  $\text{кал}/\text{моль}$ ;  $\tau$  — время до выхода образца из строя, ч.

В полулогарифмическом масштабе уравнение (4-1) имеет вид прямой линии, что дает основание для экстраполирования экспериментальных данных, полученных при высоких температурах, в область более низких температур, т. е. проведения ускоренных испытаний на нагревостойкости.

На рис. 4-1 показаны зависимости сроков службы поливинилхлорида по различным критериям и провода с изоляцией из этого материала от температуры, т. е. несмотря на различие в образцах и в критериях оценки работоспособности, углы наклона прямых для одного материала примерно одинаковые. Это обстоятельство позволяет использовать для исследования нагревостойкости проводов данные, полученные при исследовании материалов, что существенно упрощает методику определения нагревостойкости проводов и дает возможность прогнозировать величину этого параметра при их разработке.

Что касается проводов с комбинированной изоляцией

или проводов в защитной оболочке, то для них зависимость срока службы от температуры, построенная в полулогарифмическом масштабе, также обычно аппроксимируется прямой. В этих случаях правомерно говорить о некоей условной или «эквивалентной» энергии актива-

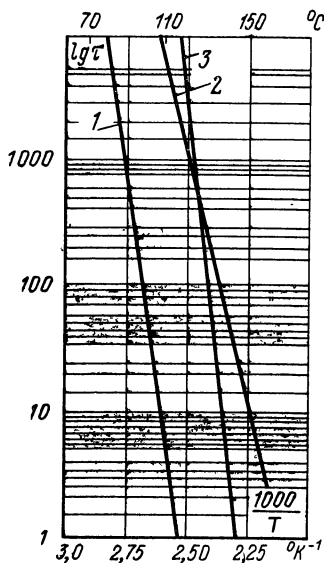


Рис. 4-2. Нагревостойкость проводов с изоляцией из поливинилхлоридного пластика.

1 — провод с изоляцией из поливинилхлорида; 2 — провод с комбинированной изоляцией лавсан — поливинилхлорид; 3 — провод в защитной оболочке из капрона.

ции комбинированной конструкции, значение которой в каждом конкретном случае необходимо определять экспериментально. В качестве примера на рис. 4-2 приведены данные по нагревостойкости провода с изоляцией из поливинилхлоридного пластика и двух его модификаций: с комбинированной изоляцией лавсан-поливинилхлорид и в защитной оболочке из термостабилизированного капрона.

Как видно из этих графиков, несмотря на то, что в основе всех трех конструкций заложен один материал — поливинилхлоридный пластикат, углы наклона прямых различны.

## 6) Разработка метода испытаний

Общие методы определения нагревостойкости изоляционных материалов и конструкций регламентируются ГОСТ 10518-63. Применительно к монтажным проводам рекомендации, изложенные в этом ГОСТ, могут быть приняты с учетом следующих уточнений и поправок.

Одним из важнейших вопросов методики определения нагревостойкости является выбор критерия работоспособности проводов после воздействия повышенных температур. ГОСТ 10518-63 за такой критерий рекомендует принимать испытание напряжением, что, безусловно, приемлемо и для монтажных проводов. Однако величины испытательных напряжений, рекомендованные этим ГОСТ, требуют уточнения.

Учитывая значительный разброс результатов испытаний проводов напряжением в нормальных условиях ( $c=0,10 \div 0,15$ ), а также то обстоятельство, что обычно величина коэффициента вариации увеличивается для проводов, подвергшихся тепловым воздействиям ( $c=0,15 \div 0,20$ ), минимальная величина пробивного напряжения при определении нагревостойкости должна определяться из неравенства:

$$\bar{U}_{\text{пр}} - t_p \sigma \geq U_p, \quad (4-2)$$

где  $t_p$  — квантиль нормального распределения, соответствующая выбранной величине надежности оценки.

Приняв  $P=0,99$  ( $t_p=2,64$ ) и  $c_{\text{ср}}=0,175$ , получаем:

$$U_{\text{пр}} - t_p \sigma = U_{\text{пр}} (1 - t_p c_{\text{ср}}) = \bar{U}_{\text{пр}} (1 - 2,64 \cdot 0,175) \geq U_p$$

или

$$\bar{U}_{\text{пр}} \geq 2U_p. \quad (4-3)$$



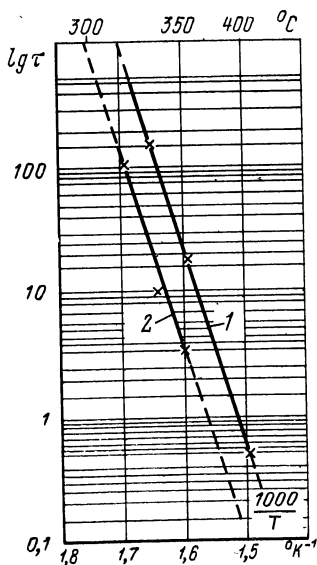


Рис. 4-3. Нагревостойкость проводов со стеклофторопластовой изоляцией.

1 — воздействие повышенной температуры без продавливающих нагрузок; 2 — то же с одновременным воздействием продавливающих нагрузок.

Таким образом, испытательное напряжение следует выбирать не менее двойного рабочего.

Вторым существенным вопросом разработки методики определения нагревостойкости является выбор условий испытаний.

В соответствии с ГОСТ 10518-63 испытания на нагревостойкость являются циклическими. Каждый испытательный цикл должен состоять из теплового старения образцов при соответствующей температуре и воздействия дополнительных электрических, механических или климатических факторов. Применительно к монтажным проводам наиболее жестким условием испытаний является воздействие повышенной температуры с одновременным воздействием продавливающих сил.

Так, на рис. 4-3 приведены зависимости срока службы провода со стеклофторопластовой изоляцией от температуры с одновременным воздействием продавливающих нагрузок и без них. Как видно из этого рисунка, разница в результатах весьма существенна.

При испытаниях перед установкой в термостат образцы проводов закрепляются на специальных приспособлениях, обеспечивающих постоянные продавливающие силы на изоляцию проводов. Величина силы выбирается равной 0,5 кгс, что приблизительно соответствует величине нагрузки на провод, создаваемой крепежными деталями при монтаже аппаратуры. Разработаны две конструкции приспособлений для продавливания проводов, схемы которых изображены на рис. 4-4.

Размеры рабочих частей (диаметры металлических стержней) указанных приспособлений выбираются с уче-

том создания равных условий для испытания проводов разных сечений:

Диаметр провода, мм . . . . .	До 2,0	2,1—3,0	Свыше 3
Диаметр стержня, мм . . . . .	6	8	10

Предварительные исследования показали примерную равноценность обеих конструкций приспособлений для создания продавливающих нагрузок.

И, наконец, существенного уточнения потребовал и способ обработки результатов испытаний, рекомендуемый ГОСТ 10518-63. В соответствии с этим ГОСТ расчет зависимости срока службы от величины испытательной температуры должен проводиться путем определения с помощью метода наименьших квадратов коэффициентов линейной регрессии и установления 95%-ной доверительной области для линии регрессии. При этом уравнение (4-1), рассмотренное выше, представляется в виде уравнения прямой линии (линейной регрессии):

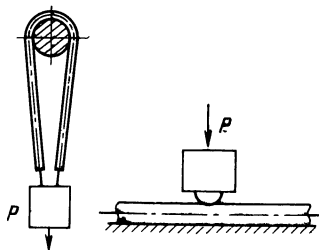


Рис. 4-4. Схемы приспособлений для создания продавливающих нагрузок.

$$Y = a + bx, \quad (4-4)$$

где  $Y = \lg \tau$  ( $\tau$  — срок службы при данной испытательной аппаратуре, ч);  $x = \frac{1}{273 + \theta}$  ( $\theta$  — температура, °C).

Границы доверительной области линии регрессии (4-4) при достоверности  $\alpha = 0,95$  для каждой испытательной температуры определяются по формуле:

$$Y_{95\theta} = Y_{\theta} \pm t_{95} S_{Y\theta}, \quad (4-5)$$

где  $t_{95}$  — квантиль распределения Стьюдента при  $\alpha = 0,95$  — величина, табулированная в зависимости от количества испытанных образцов  $N_{\theta}$ ;

$$S_{Y\theta} = S \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x_{\theta} - \bar{x})^2}{\sum (x_{\theta} - \bar{x})^2}}; \quad (4-6)$$

$N$  — общее количество образцов, испытанное при всех температурах;

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{\theta})^2}{N - 2}} \quad (4-7)$$

$Y$  — срок службы каждого образца при данной испытательной температуре.

В качестве примера на рис. 4-5 и в табл. 4-1 приведены расчет и построение доверительной области зависимости срока службы от температуры для провода с изоляцией из фторопласта 4Д.

Т а б л и ц а 4-1

Температура испытаний		$\bar{x}$	$Y_{\theta}$	Коэффициент линейной регрессии		$S_{Y\theta}$	$Y_{95}(\theta)$
°C	$1/(K \times 10^{-3})$			$a$	$b$		
300	1,74	$1,67 \cdot 10^{-3}$	2,03	—16,1	$1,05 \cdot 10^4$	0,09	1,6—2,45
325	1,67		1,3			0,083	0,9—1,9
350	1,605		0,48			0,81	0,09—0,89

Таким образом, ГОСТ 10518-63 предусмотрено построение доверительной области только для средних значений сроков службы в зависимости от температуры.

Учитывая сравнительно высокую неоднородность изоляции монтажных проводов, особенно после воздействия повышенных температур, целесообразно при построении доверительных областей зависимостей сроков службы от температуры предусматривать определенную надежность оценки. Тогда выражение (4-5) примет следующий вид:

$$Y'_{95\theta} = Y_{95\theta} \pm t_P S_{Y\theta} = Y_{\theta} \pm S_{Y\theta} (t_{95} + t_P), \quad (4-8)$$

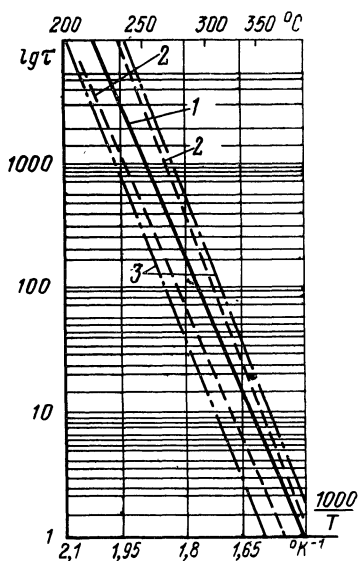
где  $t_P$  — квантиль нормального распределения для заданной величины надежности оценки  $P$ .

Построение доверительной области для рассмотренного выше примера при  $P=0,99$  ( $t_P=2,64$ ) показано на рис. 4-5,

Описанный выше метод обработки результатов испытаний проводов на нагревостойкость предусматривает выход из строя всех образцов, поставленных на испытание. Однако практически установлено, что значения сроков службы проводов при фиксированных испытательных температурах в большинстве случаев распределены по так называемому нормально-логарифмическому закону, т. е. кривая распределения этих значений имеет значительный «хвост» (рис. 1-3). Таким образом, из-за нескольких наиболее устойчивых образцов длительность испытаний существенно увеличивается, иногда и в десятки раз.

Рис. 4-5. Нагревостойкость проводов с изоляцией из фторопласта 4Д.

1 — среднее значение нагревостойкости; 2 — границы доверительной области по ГОСТ 10518-63, 3 — границы доверительной области с учетом 99% надежности оценки



Для сокращения продолжительности и стоимости испытаний может быть использован метод, позволяющий определить срок службы проводов с требуемой достоверностью по результатам испытаний, проводящихся до выхода из строя не всех, а части образцов, — метод, известный в математической статистике как метод усеченной (неполной) выборки [Л. 21] образцов, поставленных на испытание.

Таблица 4-2

K	Значения $u$ при $n/N_0$									
	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	
-2,0	-0,490	-0,430	-0,363	-0,296	-0,228	-0,154	-0,081	-0,008	0,082	
-1,9	-0,488	-0,425	-0,359	-0,290	-0,220	-0,147	-0,068	0,0105	0,103	
-1,8	-0,487	-0,422	-0,354	-0,283	-0,211	-0,138	-0,053	0,031	0,117	
-1,7	-0,484	-0,418	-0,348	-0,275	-0,200	-0,121	-0,035	0,052	0,147	
-1,6	-0,482	-0,414	-0,342	-0,266	-0,188	-0,103	-0,0105	0,0718	0,177	
-1,5	-0,478	-0,409	-0,334	-0,255	-0,175	-0,075	0,0133	0,103	0,214	
-1,4	-0,475	-0,402	-0,324	-0,241	-0,155	-0,056	0,0412	0,138	0,259	
-1,3	-0,470	-0,394	-0,314	-0,235	-0,132	-0,030	0,0785	0,182	0,318	
-1,2	-0,464	-0,384	-0,300	-0,205	-0,107	0,003	0,121	0,234	0,389	
-1,1	-0,457	-0,371	-0,281	-0,180	-0,072	0,0495	0,177	0,309	0,470	
-1,0	-0,445	-0,363	-0,260	-0,148	-0,031	0,105	0,244	0,394	0,595	
-0,9	-0,435	-0,341	-0,234	-0,108	0,021	0,174	0,340	0,521	0,720	
-0,8	-0,415	-0,310	-0,193	-0,054	0,095	0,281	0,512	0,681	0,900	
-0,7	-0,395	-0,280	-0,144	0,016	0,176	0,411	0,656	0,889	1,235	
-0,6	-0,364	-0,180	-0,070	0,114	0,271	0,599	0,892	1,23	1,690	
-0,5	-0,318	-0,172	0,0207	0,254	0,520	0,861	1,260	1,71	2,44	
-0,4	-0,265	-0,069	0,188	0,462	0,812	1,290	1,850	2,54	3,50	
-0,3	-0,170	0,068	0,384	0,739	1,290	2,000	2,870	3,98	5,73	
-0,2	-0,040	0,290	0,725	1,330	2,100	3,280	4,830	7,07	10,63	
-0,1	0,180	0,660	1,320	2,370	3,740	6,070	9,430	16,00	28,81	

Пусть в результате испытания  $N_0$  образцов при данной испытательной температуре за время  $\tau_n$  из строя вышло  $n$  образцов. При этом каждый из отказавших образцов вышел из строя в моменты времени  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$ , а общая доля отказов  $n/N_0$  составляет не менее половины.

Определяем вспомогательные величины:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \tau_i; \quad (4-9)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg \tau_i)^2; \quad (4-10)$$

$$y = (\bar{x}_2 - \bar{x}_1^2) / (\lg \tau_n - \bar{x}_1)^2. \quad (4-11)$$

По  $y$  и доле отказов  $n/N_0$  в табл. 4-2 находится условная величина  $K$  (для принятого значения  $n/N_0 \geq 0,5$  величина  $K$  является отрицательной и лежит в пределах от  $-2,0$  до  $-0,1$ ). Затем по величине  $K$  и доле отказов  $n/N_0$  из табл. 4-3 находится другая условная величина  $l$ .

Таблица 4-3

K	Значения $l$ при $n/N_0$								
	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
-2,0	4,373	3,94	3,59	3,28	3,02	2,78	2,592	2,427	2,261
-1,9	4,185	3,775	3,43	3,135	2,885	2,655	2,472	2,312	2,152
-1,8	3,997	3,6	3,27	2,985	2,745	2,525	2,349	2,195	2,042
-1,7	3,810	3,43	3,11	2,84	2,607	2,395	2,227	2,011	1,992
-1,6	3,624	3,26	2,957	2,692	2,472	2,276	2,106	1,965	1,823
-1,5	3,439	3,09	2,8	2,55	2,335	2,14	1,985	1,85	1,714
-1,4	3,254	2,92	2,64	2,4	2,197	2,012	1,864	1,734	1,604
-1,3	3,070	2,75	2,485	2,255	2,062	1,885	1,733	1,618	1,495
-1,2	2,888	2,582	2,33	2,112	1,925	1,757	1,621	1,504	1,385
-1,1	2,706	2,42	2,18	1,97	1,79	1,630	1,502	1,39	1,277
-1,0	2,525	2,25	2,02	1,824	1,655	1,505	1,382	1,275	1,168
-0,9	2,346	2,08	1,87	1,68	1,52	1,375	1,262	1,16	1,059
-0,8	2,167	1,91	1,715	1,54	1,39	1,250	1,142	1,046	0,950
-0,7	1,990	1,76	1,56	1,395	1,255	1,125	1,022	0,932	0,842
-0,6	1,815	1,595	1,412	1,255	1,122	1,00	0,904	0,818	0,739
-0,5	1,641	1,435	1,265	1,115	0,99	0,876	0,785	0,706	0,625
-0,4	1,469	1,275	1,115	0,997	0,86	0,753	0,667	0,592	0,518
-0,3	1,298	1,12	0,97	0,84	0,73	0,63	0,550	0,480	0,410
-0,2	1,129	0,96	0,82	0,70	0,60	0,506	0,432	0,367	0,302
-0,1	0,962	0,81	0,68	0,565	0,47	0,385	0,316	0,255	0,195

Среднее значение логарифма срока службы при данной испытательной температуре определяется по формуле

$$Y_{\theta} = \overline{\lg \tau} = \lg \tau_n + K S_{\text{оп}}, \quad (4-12)$$

где

$$S_{\text{оп}} = (\lg \tau_n - \bar{x}_1) / l. \quad (4-13)$$

Нижняя граница доверительного интервала для логарифма среднего срока службы при достоверности  $\alpha=0,95$  определяется по формуле

$$\lg \tau_{\text{н}} = \overline{\lg \tau} - 1,64 S_{\text{оп}} \sqrt{\frac{\hat{f}_2(K)}{N_{\theta}}}, \quad (4-14)$$

где  $\hat{f}_2(K)$  находится из табл. 4-4

Т а б л и ц а 4-4

$K$	$\hat{f}_2(K)$	$K$	$\hat{f}_2(K)$	$K$	$\hat{f}_2(K)$
—2,0	1,003	—1,3	1,019	—0,6	1,114
—1,9	1,004	—1,2	1,025	—0,5	1,147
—1,8	1,005	—1,1	1,032	—0,4	1,189
—1,7	1,006	—1,0	1,042	—0,3	1,243
—1,6	1,009	—0,9	1,054	—0,2	1,312
—1,5	1,011	—0,8	1,069	—0,1	1,401
—1,4	1,015	—0,7	1,089		

В качестве иллюстрации способа обработки опытных данных при испытаниях проводов на нагревостойкость с применением метода усеченной выборки рассмотрим следующий пример. Пусть при испытаниях 15 образцов провода с фторопластовой изоляцией при температуре  $+300^\circ\text{C}$  через 100 ч вышли из строя 9 образцов, причем 3 образца вышли из строя через 40, 3 образца — через 60 и 3 — через 80 ч. Определить нижнюю границу срока службы этих проводов при указанной испытательной температуре. Расчет приведен в табл. 4-5.

Т а б л и ц а 4-5

$n_i \tau_i$	$n_i \lg \tau_i$	$n_i (\lg \tau_i)^2$	$\sum_1^n \lg \tau_i$	$\sum_1^n (\lg \tau_i)^2$	$\overline{x_1}$	$\overline{x_2}$	$\tau_{\text{н}}, r$	$\lg \tau_{\text{н}}$
3×40	3×1,63	3×2,65	16,2	29,25	1,8	3,24	100	2
3×60	3×1,821	3×3,3						
3×80	3×1,948	3×3,8						

Продолжение табл. 4-5

$y$	$n/N_{\theta}$	$K$	$l$	$S_{\text{оп}}$	$\lg \tau$	$\overline{\tau}, r$	$\lg \tau_{\text{н}}$	$\tau_{\text{н}}, r$
0	0,6	—0,5	1,265	0,158	1,92	91	1,85	71

## 4-2. Хладостойкость

Под хладостойкостью\* (холодоустойчивостью) следует понимать свойство монтажных проводов сохранять работоспособность при воздействии отрицательных температур. Жесткие требования к хладостойкости монтажных проводов явились следствием расширения интервала рабочих температур, вызванного созданием разнообразной аппаратуры, предназначенной как для работы в условиях Арктики и Антарктики, так и для работы на больших высотах. Необходимость проверки хладостойкости монтажных проводов вызывается склонностью некоторых изоляционных материалов к растрескиванию при отрицательных температурах.

Ориентировочные данные по хладостойкости той или иной пластмассы обычно получают с помощью методов, применяемых при исследовании полимеров. Однако конструктивные особенности монтажных проводов, заключающиеся в весьма тонких цилиндрических слоях изоляции и связанных с этим особых тепловых режимах переработки пластмасс, а также сложные условия эксплуатации вынуждают разрабатывать специальные методы проверки хладостойкости этих проводов.

Понятие хладостойкости провода тесно связано с условиями его эксплуатации. Так, например, провод, предназначенный для фиксированного монтажа внутри аппаратуры, может эксплуатироваться при более низких температурах, чем провод, условия эксплуатации которого допускают изгибы при отрицательных температурах (соединение подвижных частей аппаратуры, изгибы при стыковке и расстыковке штырьевых разъемов и т. д.). Последний случай является, по-видимому, наиболее жестким из всех возможных условий эксплуатации. Поэтому для монтажных проводов обычно указывается величина хладостойкости (минимально допустимой температуры) как для случая фиксированного монтажа, так и для случая изгибов при отрицательных температурах (так называемый холодный изгиб).

Для оценки хладостойкости монтажных проводов в качестве основной испытательной аппаратуры применяются стандартные камеры холода, позволяющие ста-

---

\* В некоторых технических условиях сохранился термин «морозостойкость».



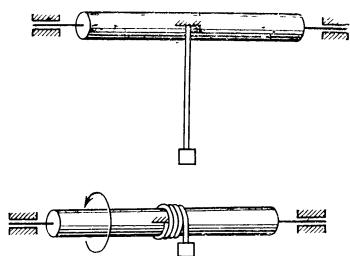


Рис. 4-6. Схема приспособления для наматывания и смотывания проводов в камере холода.

бильно получать отрицательные температуры до  $-60^{\circ}\text{C}$ . Для определения стойкости проводов к холодному изгибу эти камеры оборудуются специальными приспособлениями для изгибов проводов внутри камеры (рис. 4-6).

Критерием стойкости к изгибам при отрицательных температурах обычно выбирается величина электрической прочности проводов, испытанных в воде после соответствующей выдержки в камере холода. Необходимо

отметить, что совмещение механических и электрических испытаний при проверке хладостойкости монтажных проводов гарантирует выявление таких дефектов изоляции (микротрещин), которые не могут быть обнаружены другими способами.

С целью определения наиболее жестких условий проведения испытаний рассмотрим следующие факторы, способные оказывать влияние на их результаты:

- а) время выдержки образцов в камере холода;
- б) количество изгибов при отрицательных температурах;
- в) кратность изгиба образцов.

При исследовании влияния времени выдержки в камере холода на величину хладостойкости монтажных проводов образцы проводов с изоляцией из полиэтилена и политетрафторэтилена выдерживались при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  от 0,5 до 24 ч. Количество и кратность изгибов при этом сохранялись постоянными.

Результаты испытаний показали, что время выдержки образцов при морозе практически не сказывается на величине электрической прочности монтажных проводов. Это обстоятельство позволяет значительно сократить принятое время выдержки в камере холода (так, например, в соответствии с техническими условиями США на монтажные провода MIL-W-16878 время выдержки образцов при морозе должно быть не менее 4 ч). Дальнейшие испытания проводов на хладостойкость проводились при выдержке в камере холода в течение 1 ч.

Исследование влияния количества изгибов при отрицательных температурах на электрическую прочность монтажных проводов показало, что количество изгибов, так же как и время выдержки, практически не влияет на величину хладостойкости. Так, при испытаниях проводов с полиэтиленовой и фторопластовой изоляцией при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$ , а проводов с изоляцией из поливинилхлорида при  $-40^{\circ}\text{C}$  электрическая прочность образцов практически не изменилась при количестве изгибов от 1 до 50. При испытаниях же проводов с изоляцией из поливинилхлорида при температуре  $-45^{\circ}\text{C}$  трещины на поверхности изоляции образовались при первом же изгибе. Таким образом, при испытаниях проводов на хладостойкость мы можем принять минимальное количество изгибов, что существенно упрощает методику испытаний.

И наконец, исследование влияния кратности изгиба на величину хладостойкости проводилось на проводах с разными типами изоляции сечением 0,2 и 1,5 мм<sup>2</sup>. Образцы выдерживались в камере холода при соответствующих отрицательных температурах в течение 1 ч и затем трижды изгибались вокруг стержней диаметрами, равными 1, 3, 5, 7 и 10 диаметрам проводов (табл. 4-6).

Данные, приведенные в табл. 4-6, показывают, что для монтажных проводов кратность изгиба при отрицательных температурах также практически не влияет на величину их хладостойкости.

На основании приведенных исследований выбрана методика испытания монтажных проводов на стойкость к изгибам при отрицательных температурах. Определение хладостойкости проводится на пяти образцах провода длиной не менее 0,5 м, взятых из партии, прошедшей приемосдаточные испытания высоким напряжением. Испытания проводятся в камере холода, снабженной приспособлением, показанным на рис. 4-6. Диаметры стержней этого приспособления выбираются из расчета трехкратного диаметра провода. Величина груза должна обеспечивать достаточное натяжение провода, намотанного на стержень.

После выдержки в камере холода в течение 1 ч образцы при той же температуре трижды навиваются на стержень. Затем образцы вынимаются из камеры холода, выдерживаются до достижения комнатной температуры и исследуются визуально. При отсутствии на

Таблица 4-6

Тип изоляции	Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	$U_{пр}$ в нормальных условиях, кВ	$U_{пр}$ в зависимости от температуры				
			—40 °С				
			10	7	5	3	1
Поливинилхлоридный пластикат	0,20	14,5	15,0	14,0	14,0	14,0	13,0
	1,5	15,2	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Полиэтилен высокой плотности	0,20	29,5	—	—	—	—	—
	1,5	22,8	—	—	—	—	—
Политетрафторэтилен	0,20	13,5	—	—	—	—	—
	1,5	13,7	—	—	—	—	—

поверхности провода видимых трещин образцы испытываются напряжением в воде. Провод считается выдержавшим испытание, если все образцы выдержали в течение 1 мин испытательное напряжение, величину которого находят по (2-1).

Необходимо упомянуть еще один весьма тяжелый случай эксплуатации монтажных проводов при отрицательных температурах, когда воздействие последних совмещается с воздействием вибрационных и ударных нагрузок. При охлаждении некоторые изоляционные материалы становятся хрупкими, что может явиться причиной разрушения изоляции при воздействии вибраций и ударов.

В связи с этим в последнее время получили распространение такие методы испытания монтажных проводов на хладостойкость, при которых воздействие низких температур сочетается с воздействием вибрационных и ударных нагрузок. Для этого в холодильную камеру вводятся рабочие части вибрационных и ударных стендов, и на них крепятся провода. После таких воздействий целостность изоляции проверяется путем испытания проводов напряжением в воде при нормальной температуре.

Следует отметить также, что в некоторых случаях существенно важным оказывается степень снижения гибкости проводов при отрицательных температурах. Речь идет о тех случаях, когда провода, соединяющие подвижные относительно друг друга элементы аппара-

—45 °C					—60 °C				
10	7	5	3	1	10	7	5	3	1
Трещины на поверхности изоляции					— —	— —	— —	— —	— —
— —	— —	— —	— —	— —	30,0 24,0	27,0 19,0	25,0 21,0	25,0 20,0	24,0 19,0
— —	— —	— —	— —	— —	13,0 14,0	13,0 14,0	12,5 14,0	12,5 11,5	12,0 13,5

туры, создают дополнительный момент сопротивления движению элементов, который вносит искажение в работу схемы. Естественно, что в подобных случаях степень снижения гибкости требует экспериментального определения. Такие испытания аналогичны испытаниям гибкости проводов (см. гл. 3) с той лишь разницей, что они проводятся в камере холода при соответствующей отрицательной температуре.

### 4-3. Стойкость к циклическому воздействию температур

Склонность изоляционных пластмасс к растрескиванию наиболее полно проявляется при резких колебаниях температуры окружающей среды. При этом наиболее жесткие условия создаются при резком переходе от минимальной к максимальной рабочей температуре.

Под стойкостью монтажных проводов к циклическому воздействию температур понимают их свойство сохранять работоспособность в условиях эксплуатации при резких колебаниях окружающей температуры. Критерием стойкости к циклическому воздействию температур является отсутствие трещин после заданного количества циклов охлаждения — нагрев.

В результате предварительных исследований была разработана следующая методика испытаний монтажных проводов на стойкость к циклическому воздействию температур. Для испытаний отбирают по 10 образцов каждого типа провода длиной 1,5 м. Перед началом

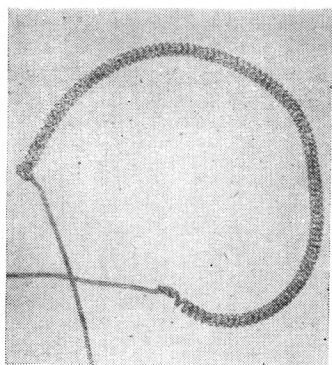


Рис. 4-7. Внешний вид образцов, подготовленных для испытаний на стойкость к циклическим воздействиям температур.

испытаний образцы навивают на стержень диаметром, равным трехкратному диаметру провода. Длина навитой части образца должна быть не меньше 1 м (рис. 4-7).

Образцы, навитые в виде спирали, снимаются со стержня и погружаются в воду, где предварительно испытываются в течение 1 мин высоким напряжением (табл. 2-1). Затем измеряется сопротивление изоляции образцов, и последние помещаются в камеру холода, температура которой должна быть равной минимальной рабочей температуре провода. После выдержки в ка-

мере холода в течение 1 ч образцы переносят в термостат, нагретый до максимальной рабочей температуры провода и выдерживают в нем также в течение 1 ч (время переноса образцов из камеры холода в термостат не должно превышать 3 мин). Цикл охлаждение — нагрев повторяют 5 раз с интервалами между циклами не более 5 мин. По окончании пятого цикла образцы погружают в воду, измеряют величину сопротивления изоляции, испытывают в течение 1 мин высоким напряжением и затем поднимают напряжение до пробоя.

Провод считается стойким к циклическому воздействию температур, если величина пробивного напряжения после пяти циклов охлаждение — нагрев удовлетворяет соотношению

$$\bar{U}_{\text{пр}} - 3\sigma \geq 2U_p,$$

где  $\bar{U}_{\text{пр}}$  — среднее значение пробивного напряжения, кВ;  $\sigma$  — стандартное отклонение, кВ;  $U_p$  — рабочее напряжение провода, кВ.

В табл. 4-7 приведены результаты испытаний основных типов монтажных проводов на стойкость к циклическому воздействию температур.

Результаты этих испытаний показывают, что основные типы монтажных проводов обладают достаточной

Таблица 4-7

Тип изоляции	Интервал рабочих температур, °C	Рабочее напряжение, кВ	Статистические параметры распределения значений пробивных напряжений после пяти циклов охлаждения—нагрев		
			$U_{пр},$ кВ	$\sigma, кВ$	$U_{пр}-3\sigma$
Поливинилхлоридный пластикат	$-40 \div +70$	0,5	13	1,7	7,9
Полиэтилен высокой плотности	$-60 \div +85$	0,5	19,3	4,1	7,0
Кремнийорганическая резина	$-60 \div +200$	0,5	12,2	1,4	8,0
Политетрафторэтилен	$-60 \div +250$	0,5	11,6	0,6	9,8

стойкостью к циклическому воздействию температур, что позволяет отнести проверку этого параметра к конструкторским испытаниям.

#### 4-4. Влагостойкость

Под влагостойкостью (влагоустойчивостью) монтажных проводов следует понимать их свойство сохранять работоспособность после длительного воздействия влажной среды. Количественно влагостойкость может быть оценена временем допустимой эксплуатации во влажной среде. Однако для современных монтажных проводов с монолитной пластмассовой изоляцией это время практически сравнимо со сроком их хранения и эксплуатации. Что касается некоторых проводов с негерметичной (например, пленочной) изоляцией, то они могут быть рекомендованы только для эксплуатации внутри герметизированной аппаратуры, без доступа влаги. Различают следующие условия эксплуатации проводов во влажной среде:

а) в атмосфере с относительной влажностью 98% при нормальной температуре;

б) в атмосфере с относительной влажностью 98% при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  (тропическая влажность).

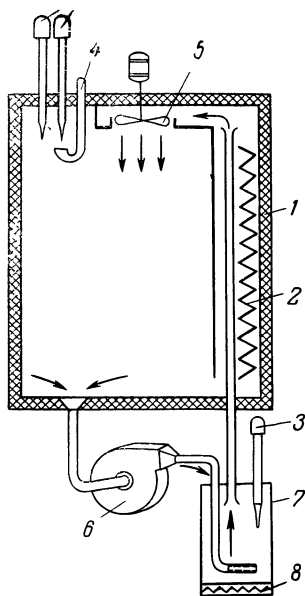


Рис. 4-8. Принципиальная схема влагокамеры типа ТВК-2.

1 — испытательная камера; 2 — электронагреватель; 3 — контактные термометры; 4 — сосуд с водой для смачивания мокрого термометра; 5 — вентилятор осевой; 6 — вентилятор центробежный; 7 — испаритель; 8 — электронагреватель испарителя

Критерием влагостойкости монтажных проводов обычно выбирают определенный уровень сопротивления изоляции. Влагостойкость проводов в условиях повышенной влажности измеряется с помощью термо-влажеокамеры, например типа ТВК-2. Принципиальная схема этой камеры изображена на рис. 4-8.

Основным вопросом разработки методики определения влагостойкости монтажных проводов являлся выбор оптимального времени выдержки их во влажной среде. По нормам, принятым в разных странах, влагостойкость монтажных проводов должна определяться после выдержки их во влажной среде в течение 30—60 суток.

Однако результаты испытаний, проведенных авторами, показали, что в пределах 10 000 ч пребывания в среде с тропической влажностью величина сопротивления изоляции большинства типов монтажных проводов практически

не меняется. Некоторое исключение составляют провода с изоляцией из поливинилхлоридного пластика. Однако и здесь изменение сопротивления изоляции происходит в течение первых 24 ч пребывания во влажной среде и в дальнейшем не наблюдается.

Таким образом, можно считать, что время выдержки проводов во влажной среде практически не влияет на величину влагостойкости. Это обстоятельство позволяет существенно упростить методику определения влагостойкости монтажных проводов путем сокращения времени выдержки проводов во влажной среде (максимально 48 ч).

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ

Развитие атомной и космической техники поставило задачу по созданию радиоэлектронной аппаратуры, стойкой к воздействию ионизирующей радиации. Монтажные провода, применяемые в качестве элементов аппаратуры ядерных энергетических установок, изотопных источников излучений, космических кораблей и т. д., в условиях воздействия интенсивных потоков ионизирующей радиации могут в значительной степени определять работоспособность отдельных узлов, блоков и аппаратуры в целом.

Целью настоящей главы является качественное рассмотрение основных вопросов, связанных с влиянием ионизирующей радиации на работоспособность монтажных проводов.

Воздействию излучения высокой энергии обычно подвергаются все конструктивные элементы монтажных проводов: токопроводящие жилы, изоляция и защитные покрытия. При этом в конструкционных материалах возникают инициированные радиацией различные химические и физические процессы, носящие как обратимый, так и необратимый характер. К числу обратимых процессов относятся, например, снижение сопротивления изоляции и возникновение наведенной электродвижущей силы, к числу необратимых — деструкция и сшивание полимерных материалов, окисление, изменение кристаллической структуры и т. п. [Л. 27, 49].

Результатом воздействия излучения высокой энергии на монтажные провода может быть снижение их электрических, климатических и механических характеристик, растрескивание изоляции и защитных оболочек и ряд других явлений.

Свойство монтажных проводов сохранять работоспособность при воздействии ионизирующей радиации называется радиационной стойкостью. Количественно радиационная стойкость оценивается по допустимому сроку службы в заданных условиях облучения, либо по поглощенной дозе и мощности поглощенной дозы для конструкционных материалов, при которых монтажные провода сохраняют работоспособность [Л. 56, 57].



## 5-1. Основные понятия. Единицы измерения [Л. 2, 56]

Термин «излучение высокой энергии» относится как к коротковолновым электромагнитным излучениям (рентгеновскому и гамма-излучениям), так и к частицам, движущимся с большой скоростью: быстрым электронам, протонам, нейтронам,  $\alpha$ -частицам. Общей характерной особенностью этих частиц и квантов является их высокая энергия, значительно превосходящая энергию связи электронов в атомах и молекулах.

Проходя через вещество, все указанные виды излучения теряют энергию, взаимодействуя с электронами и атомными ядрами вещества. Результатом этого взаимодействия может быть ионизация и возбуждение атомов и молекул, смещение ядер и некоторые другие процессы. Благодаря способности излучений высокой энергии производить ионизацию, их часто называют ионизирующими излучениями.

Условия облучения образцов могут быть достаточно полно охарактеризованы заданием вида излучения, энергетического спектра и пространственно-временного распределения плотности потока частиц или квантов. В дополнение к этим величинам часто применяют величину, называемую потоком частиц или квантов. Поток определяется как временной интеграл от плотности потока за весь срок облучения.

В случае рентгеновских и  $\gamma$ -лучей с энергией до 3 Мэв с целью описания условий облучения могут применяться понятия экспозиционной дозы, измеряемой в рентгенах ( $p$ ), и мощности экспозиционной дозы облучения, измеряемой в рентгенах в секунду.

Рентген определяется как доза рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, при которой в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст. образуются ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу количества электричества (ICGSE) каждого знака.

В связи с тем что материалы обладают неодинаковой тормозной способностью по отношению к различным видам радиации, указанные характеристики, описывая условия облучения, не отражают непосредственно степени радиационного воздействия на облучаемый объект. Между тем именно степень радиационного воздействия и связанная с ней глубина химических и физических

изменений в веществе представляют наибольший практический интерес при изучении радиационной стойкости монтажных проводов. По этой причине при радиационных измерениях удобнее пользоваться другими величинами, такими как поглощенная доза и мощность поглощенной дозы.

Поглощенная доза характеризуется величиной энергии, полученной от излучения единицей массы облучаемого вещества. Единицей измерения поглощенной дозы является рад. Один рад соответствует 0,01 дж энергии излучения, поглощенной в 1 кг облучаемого вещества. Понятие поглощенной дозы одинаково применимо для всех видов излучения высокой энергии и всех видов облучаемых материалов. Мощность поглощенной дозы характеризует скорость накопления веществом поглощенной энергии и измеряется в рад/с.

## **5-2. Источники ионизирующих излучений [Л. 4, 49, 56, 57]**

Общий технический прогресс и широкий размах работ по использованию атомной энергии способствовали созданию весьма разнообразных источников излучения высокой энергии как аппаратных, так и изотопных. При исследовании радиационной стойкости монтажных проводов могут быть использованы ускорители заряженных частиц, изотопные источники излучений и ядерные реакторы [Л. 56].

Существует много типов ускорителей заряженных частиц, применяемых в области радиационных исследований. Наибольшее распространение получили ускорители электронов. Выбор вида заряженных частиц обусловлен сравнительной простотой генерирования и умеренной проникающей способностью быстрых электронов. По способу ускорения ускорители могут быть разделены на две группы. В ускорителях первой группы (ускоритель Ван де Граафа, резонансный трансформатор и др.) используется принцип прямого ускорения, т. е. ускоряемые заряженные частицы приобретают энергию в процессе прохождения промежутка с высокой разностью потенциалов. В ускорителях второй группы (циклические и линейные ускорители) ускорение заряженных частиц осуществляется за счет энергии высокочастотного электромагнитного поля.

Для исследования радиационной стойкости монтажных проводов могут быть использованы ускорители с энергией ускоренных электронов от 0,5 до 8 Мэв при достаточно большом токе пучка, позволяющем получить необходимую мощность поглощенной дозы. Применение ускоренных электронов с энергией более 8 Мэв нежелательно из-за возможности появления наведенной радиоактивности облученных образцов. Электроны с энергией менее 0,5 Мэв имеют незначительную проникающую способность и могут найти лишь весьма ограниченное применение [Л. 2, 49].

Среди многочисленных изотопных источников ионизирующей радиации наибольшее распространение получили гамма-установки радиоактивного  $\text{Co}^{60}$ . Гамма-излучение с энергией квантов 1,33 и 1,17 Мэв генерируется в этих источниках в процессе радиоактивного распада кобальта с периодом полураспада 5,3 года [Л. 2, 49].

Изотопные источники  $\beta$ -частиц  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Cs}^{137}$  также могут быть использованы при исследованиях радиационной стойкости монтажных проводов, однако эти источники уступают электронным ускорителям по плотности потока и возможности варьирования энергий быстрых электронов [Л. 57].

Ядерные реакторы — устройства, обеспечивающие проведение управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер под действием нейтронов, — являются мощными источниками смешанного излучения высокой энергии. Важной характеристикой реакторного излучения является энергетический спектр нейтронов. Энергетические спектры нейтронов в разных реакторах различны. Тем не менее практически эти различия оказываются несущественными, и можно считать, что реальные спектры нейтронов близки к теоретическому спектру нейтронов спонтанного деления [Л. 4]. В спектре имеется наиболее вероятная энергия, равная 0,7 Мэв. Расчет показывает, что средняя энергия нейтронов деления равна 2 Мэв, вообще же в спектре присутствуют нейтроны с энергией от нескольких десятков кэв до 10 Мэв и в очень незначительных количествах нейтроны меньших и больших энергий [Л. 57].

Значительная часть энергии, освобождающейся в ядерном реакторе, приходится на долю тяжелых осколков делящихся ядер. Эти осколки имеют очень малый

пробег (несколько микрон), поэтому практически вся их кинетическая энергия преобразуется в тепловую энергию реактора. Основная часть образующихся в ядерном реакторе электронов имеет энергию около 0,4 Мэв и также поглощается в материалах реактора, не давая заметного вклада в поглощенную дозу для облучаемых образцов. Поглощенная доза в материалах облучаемых изделий обусловлена главным образом действием нейтронов и сопутствующего гамма-излучения [Л. 57].

### 5-3. Дозиметрия

Научное направление по измерению излучений и их взаимодействия с веществом называется дозиметрией.

Существует большое количество экспериментальных и расчетных методов дозиметрии. В связи с вопросом радиационной стойкости монтажных проводов нас будут интересовать методы определения поглощенной дозы. Различают абсолютные и относительные методы определения поглощенной дозы. Первые из них используют непосредственное измерение энергии, поглощенной облучаемым образцом. К таким методам относятся, например, калориметрические методы [Л. 1, 49]. Относительные методы дозиметрии позволяют находить поглощенную дозу путем измерения определенных параметров, значения которых отградуированы с помощью абсолютных методов. К числу относительных методов дозиметрии относятся методы измерения излучений по производимой ими ионизации, по почернению фотоэмульсий и стекол, по выходу гель-фракции сшивающихся полимеров и т. п. [Л. 49].

Излучение высокой энергии, проходя через вещество, вызывает протекание различных химических реакций. Химические методы дозиметрии основаны на измерении радиационно-химических изменений состава или физико-химического состояния веществ.

Среди химических методов дозиметрии большое распространение получил ферросульфатный метод. Сущность этого метода заключается в том, что ионы двухвалентного железа, находящиеся в насыщенной кислородом разбавленной серной кислоте, в результате радиационного воздействия окисляются в ионы трехвалентного железа. Концентрация образующихся ионов

трехвалентного железа пропорциональна поглощенной дозе. Коэффициент пропорциональности можно рассчитать, исходя из экспериментально измеренного значения радиационно-химического выхода 15,6 ионов на поглощенную энергию 100 эв [Л. 1].

В самом деле, если 1 л раствора получит от излучения энергию 100 эв, то в нем образуется 15,6 иона трехвалентного железа, при этом поглощенная доза будет равна  $1,602 \cdot 10^{-15} \rho^{-1}$  рд. Здесь  $\rho$  — плотность раствора, г/см<sup>3</sup>. Следовательно, для образования одного иона в литре раствора требуется поглощенная доза  $1,025 \times 10^{-16} \rho^{-1}$  рд. Если после облучения концентрация ионов трехвалентного железа в растворе оказалась равной  $C$  моль/л, то соответствующая поглощенная доза  $D$  в радах будет равна:

$$D = CN_A \cdot 1,025 \cdot 10^{-16} \rho^{-1}. \quad (5-1)$$

Это и есть основная формула для определения поглощенной дозы по ферросульфатному дозиметру. Здесь  $N_A$  — число Авогадро [Л. 1].

Концентрация  $C$  может быть определена с помощью ультрафиолетовой спектрофотометрии раствора по формуле [Л. 1]

$$C = 4,57 \cdot 10^{-4} \lg \frac{I_0}{I}, \quad (5-2)$$

где  $I_0$  и  $I$  — интенсивности ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,305 мкм до и после прохождения через слой раствора толщиной 1 см.

Ферросульфатный дозиметр может быть эффективно использован при облучении монтажных проводов на кобальтовых гамма-установках и на электронных ускорителях. При этом следует иметь в виду, что с ним необходимо работать в таком диапазоне доз и при таких мощностях доз, когда имеющегося в растворе кислорода достаточно для нормального протекания реакции и когда в растворе не появляются области с недостатком кислорода. Практически применимые максимальные значения поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы для ферросульфатного дозиметра составляют приблизительно  $4 \cdot 10^4$  рд и 50 рд/сек соответственно. В случае работы с более мощными потоками излучений и при более высоких поглощенных дозах могут использоваться методы дозиметрии, основанные на окрашивании стекол, изменении поглощения света в полистироле, в поли-

метилметакрилате, в окрашенном целлофане, гель-фракции сшивающихся полимеров и другие методы, подробно описанные в специальной литературе [Л. 1, 39, 49]

Для регистрации нейтронов определенных энергий часто используют метод так называемых пороговых индикаторов. В основе этого метода лежит образование радиоактивных ядер при бомбардировке нейтронами стабильных изотопов в зависимости от энергии нейтронов. Например, при облучении ядер  $\text{Np}^{237}$  нейтронами с энергией  $E \geq 0,7 \text{ Мэв}$  эти ядра подвергаются радиоактивному распаду. Если же энергия нейтронов  $E < 0,7 \text{ Мэв}$ , то вероятность радиоактивного распада становится чрезвычайно малой. Реакция распада при облучении нейтронами может быть инициирована также в  $\text{U}^{238}$ , при этом энергия нейтронов должна быть  $E \geq 1,5 \text{ Мэв}$ . Пороговая энергия нейтронов для  $\text{S}^{32}$  равна  $2,5 \text{ Мэв}$ . При облучении  $\text{S}^{32}$  нейтронами с энергией  $E \geq 2,5 \text{ Мэв}$  происходит захват нейтрона, выделение протона и образование  $\text{P}^{32}$ . Существует большое количество различных пороговых индикаторов, чувствительных к нейтронам, энергия которых больше или меньше некоторых определенных значений. Среди них можно назвать  $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{In}$  и др. Пороговые энергии различных ядерных реакций для большого количества изотопов приведены в [Л. 2].

Применяя набор пороговых индикаторов, можно определить число нейтронов, энергия которых находится в пределах между соседними пороговыми значениями, и построить тем самым гистограмму, соответствующую энергетическому спектру нейтронов. Зная энергетический спектр и интегральный поток нейтронов, можно рассчитать поглощенную дозу [Л. 49].

#### **5-4. Изменения свойств монтажных проводов, вызванные действием радиации**

Изменения свойств монтажных проводов в большой степени зависят от соответствующих изменений эксплуатационных характеристик конструкционных материалов. Известно, что ионизирующая радиация при определенных значениях поглощенной дозы может как ухудшать, так и улучшать свойства материалов [Л. 57].

На рис. 5-1 представлены изменения сопротивления разрыву и относительного удлинения некоторых поли-

мерных материалов, широко применяющихся при изготовлении монтажных проводов, в зависимости от поглощенной дозы. Видно, что в начальной стадии облучения некоторые характеристики отдельных материалов имеют повышенные значения по сравнению с исходными. Однако при достаточно больших дозах все материалы пре-

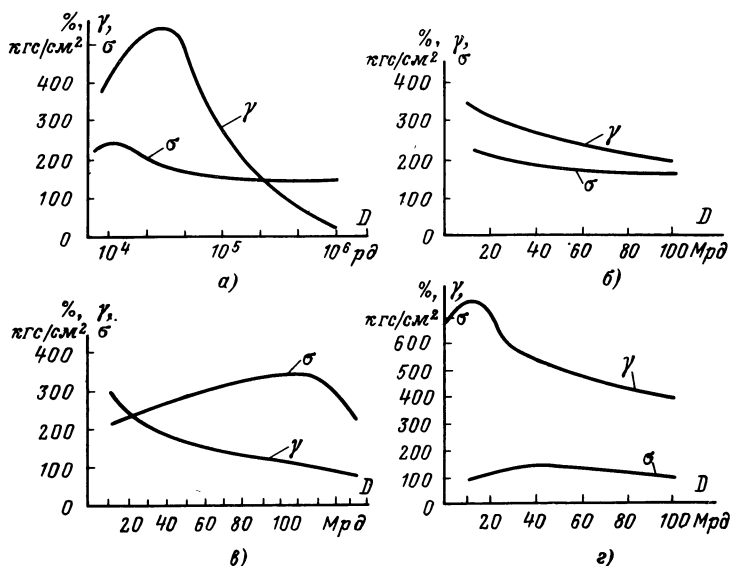


Рис. 5-1. Зависимость сопротивления разрыву  $\sigma$  и относительного удлинения  $\gamma$  некоторых полимерных материалов от поглощенной дозы  $D$ .

а — политетрафторэтилен; б — пластифицированный поливинилхлорид; в — полиэтилен высокой плотности; г — полиэтилен низкой плотности.

терпевают необратимые изменения свойств, приводящие к потере работоспособности изделий, в составе которых они эксплуатируются [Л. 27, 49].

Заметное снижение сопротивления разрыву и относительного удлинения политетрафторэтилена наблюдается уже при поглощенной дозе  $2 \cdot 10^4$  и  $10^5$  рд соответственно (рис. 5-1, а). Поглощенная доза  $10^6$  рд приводит практически к полной потере работоспособности политетрафторэтилена в качестве конструкционного материала [Л. 56].

Сопротивление разрыву и относительное удлинение поливинилхлорида и полиэтиленов высокой и низкой

плотности с возрастанием поглощенной дозы изменяются менее резко (рис. 5-1,б—г), но и для них существуют некоторые значения поглощенной дозы, ограничивающие возможность дальнейшей эксплуатации монтажных проводов в условиях действия ионизирующей радиации [Л. 49, 56]. Окончательный вывод о максимально допустимом для монтажных проводов значении поглощенной дозы может быть сделан исходя из конкретных технических требований, предъявляемых к этим проводам, с учетом конструктивных особенностей проводов, на основании экспериментальных данных по зависимости свойств конструкционных материалов от поглощенной дозы.

Многочисленные эксперименты с полимерными материалами показали, что при облучении в инертной среде физико-механические характеристики этих материалов, измеренные после облучения, практически не зависят от мощности поглощенной дозы в весьма широком интервале ее значений. Зависимость от мощности поглощенной дозы проявляется при облучении в присутствии кислорода и других химически активных газов и агрессивных веществ, причем характер этой зависимости в большинстве случаев определяется концентрацией химически активных молекул, растворенных в облучаемых материалах, и скоростью их диффузии. На рис. 5-2 представлена зависимость относительного удлинения политетрафторэтилена от мощности поглощенной дозы при облучении быстрыми электронами. Более высокие значения относительного удлинения при больших мощностях дозы, очевидно, указывают на меньшее влияние кислорода воздуха, не успевающего диффундировать в глубинные слои материала [Л. 57].

Влияние среды может быть неодинаковым для различных материалов. Например, при облучении в присутствии кислорода политетрафторэтилен значительно быстрее теряет свои физико-механические свойства, чем

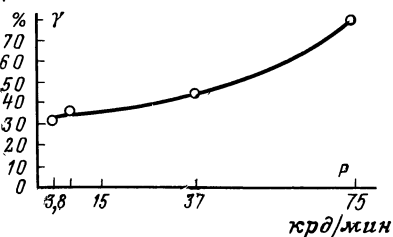


Рис. 5-2. Зависимость относительного удлинения  $\gamma$  политетрафторэтилена от мощности поглощенной дозы  $P$  (облучение на воздухе,  $D=1$  Мрб).



в бескислородной среде [Л. 54], в то же время радиационное сшивание кремнийорганической резины в присутствии кислорода замедляется [Л. 48], что способствует сохранению исходных свойств этого материала.

Чувствительными к действию ионизирующей радиации оказываются и проводниковые материалы монтажных проводов. Известно, что в результате упругого столкновения с быстрой частицей атомы металла, получив достаточно большую кинетическую энергию, смещаются из своего положения в кристаллической решетке, что приводит к образованию структурных дефектов. В зависимости от энергии выбитых атомов возможны различные конфигурации радиационных дефектов, начиная от точечных дефектов: вакансий и межузельных атомов, кончая крупными зонами повреждения в несколько нанометров [Л. 25]. Появление структурных дефектов приводит к снижению проводимости металлов.

В составе монтажных проводов часто используется медная проволока, покрытая серебром, оловом, никелем и т. п. В результате радиационного воздействия может происходить взаимное проникновение атомов покрытия в медь и наоборот. Радиационная диффузия металла в металл, так же как и в случае возникновения дефектов, приводит к возрастанию электросопротивления проводниковых материалов.

Радиационное облучение даже при сравнительно невысоких интенсивностях может усиливать коррозионные явления в присутствии влаги и химически активных веществ [Л. 9]. Результатом коррозии может быть частичное или полное разрушение токоведущих элементов монтажных проводов.

Все эти явления до настоящего времени еще мало изучены, поэтому количественная оценка их вклада в радиационное старение монтажных проводов представляет значительные трудности.

Сопротивление изоляции монтажных проводов в процессе облучения уменьшается с ростом мощности поглощенной дозы, как показано на рис. 5-3. После прекращения облучения происходит восстановление исходного значения этой величины. Изменение сопротивления изоляции является следствием появления наведенной проводимости электроизоляционных материалов. Как показали исследования [Л. 55], наведенная проводимость и

скорость восстановления исходного значения проводимости после прекращения облучения существенно зависят от температуры. Характер температурной зависимости наведенной проводимости для некоторых электроизоляционных материалов показан на рис. 5-4 (в координатах Аррениуса).

При исследовании влияния излучения высоких энергий на монтажные провода могут возникнуть серьезные методические затруднения, обусловленные не только спецификой работы с радиоактивными веществами, но и сложностью процессов, протекающих в веществе под воздействием излучения. Например, в процессе облуче-

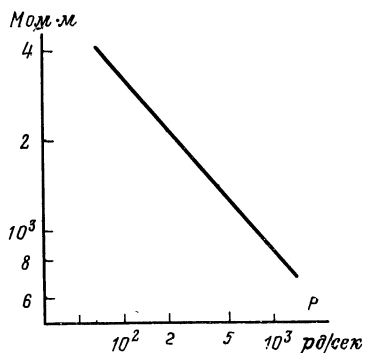


Рис. 5-3. Зависимость сопротивления изоляции  $R$  монтажного провода (изоляция — политетрафторэтилен) от мощности поглощенной дозы  $P$ .

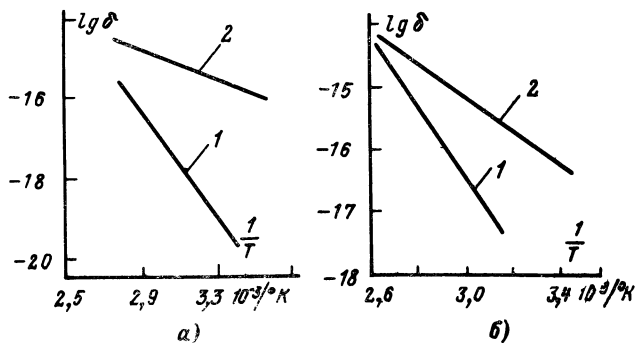


Рис. 5-4. Зависимость логарифма проводимости  $\lg \delta$  электроизоляционных материалов от облучения (1) и в процессе облучения рентгеновскими лучами с интенсивностью  $7 \text{ рд/мин}$  (2).

а — полиэтилен низкой плотности; б — политетрафторэтилен.

ния в образце может возникнуть электродвижущая сила, величина которой может достигать сотен и тысяч вольт [Л. 27, 28]. Ф. И. Коломойцев и А. Я. Якунин считают,

что образование э. д. с. связано с возникновением неоднородности распределения зарядов по объему образца [Л. 29], появляющейся вследствие того, что по мере проникновения в диэлектрик интенсивность излучения убывает. Отсюда можно сделать вывод о том, что с изменением толщины электроизоляционного слоя величина наведенной э. д. с. может меняться.

Таковы общие черты основного круга вопросов, которые встают перед специалистом-кабельщиком при изучении радиационной стойкости монтажных проводов.

## **Глава шестая**

### **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

#### **6-1. Стойкость к агрессивным средам**

В ряде случаев в процессе эксплуатации монтажные провода могут подвергаться воздействию различных химических веществ. К ним относятся: бензин, керосин, различные масла, кислоты, щелочи и т. д. Во многих случаях воздействие указанных сред приводит к снижению электрических и механических характеристик монтажных проводов.

Под стойкостью монтажных проводов к агрессивным средам (химстойкостью) понимают их свойство сохранять работоспособность при воздействии бензина, керосина, масла и т. п.

Следует отметить, что воздействие разных реагентов на кабельные материалы может быть различным. Так, если политетрафторэтилен (фторопласт 4) не восприимчив почти ко всем химическим воздействиям, то полиэтилен, например, хотя и стоек к воздействию неорганических кислот и спиртов, но не обладает стойкостью по отношению к минеральным маслам (например, трансформаторному) и набухает в нем тем сильнее, чем выше температура. В связи с этим в пределах общего понятия стойкости к агрессивным средам следует различать понятие стойкости к бензину, к маслам, кислотостойкости и т. д.

Количественно стойкость монтажных проводов к агрессивным средам может быть оценена допустимым временем пребывания их в той или иной среде с опре-

деленной концентрацией и при определенной температуре.

Поскольку при соприкосновении проводов с бензином, маслом и другими агрессивными средами в отдельных случаях возможно разложение и набухание изоляционного материала, критериями оценки химостойкости проводов обычно выбирают испытание их высоким напряжением, а также степень приращения массы изоляции в результате набухания.

Как правило, проверку стойкости монтажных проводов к агрессивным средам производят в бензине, в минеральном масле (типа машинного или автола) и в соленой воде, содержащей в одном литре дистиллированной воды следующие соли: хлористый натрий (27 г), безводный хлористый магний (6 г), безводный хлористый кальций (1 г), хлористый калий (1 г).

Эти испытания производят на образцах проводов длиной не менее 1,5 м, навитых в виде спирали с радиусом, равным трехкратному диаметру провода. При испытаниях в любой из сред образцы выдерживаются в ней в течение 20 ч. При этом температура бензина должна быть +20 °С, а температура масла и соленой воды +50 °С. После удаления образцов из среды их выдерживают в течение часа в нормальных условиях и затем испытывают высоким напряжением, значение которого находят по (2-1).

При оценке величины набухания образец изоляции длиной 10 см в виде трубочки, снятой с жилы, взвешивается на аналитических весах и погружается в соответствующую агрессивную среду.

После выдержки в среде в указанных выше условиях образец снова взвешивается. Степень набухания изоляции оценивается по формуле

$$\Delta G = \frac{G' - G}{G} 100\%, \quad (6-1)$$

где  $G$  — масса образца до погружения в агрессивную среду;  $G'$  — масса образца после пребывания в агрессивной среде.

Провод считается стойким к данной среде, если увеличение массы изоляции в результате набухания не превышает 10 %.

## 6-2. Негорючесть

При выборе монтажных проводов для ответственной аппаратуры необходимо знать степень воспламеняемости материалов изоляции и оболочек. Существенно также, будет ли возникшее на одном из концов провода пламя распространяться по проводу. В связи с этим существует два принципа, исходя из которых построены все методики испытания проводов на негорючесть; по первому измеряется время, потребное для угасания пламени на проводе, после его выдержки в пламени газовой или бензиновой горелки в течение заданного времени; по второму измеряется скорость или длина распространения пламени по проводу, также подожженному в пламени горелки. Примером методики испытания проводов на негорючесть, построенной по первому принципу, может служить методика, предложенная Норвежским национальным комитетом Международной электротехнической комиссии (МЭК), для испытаний проводов с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката. По мнению авторов, методика определения негорючести таких проводов при нормальной окружающей темпера-

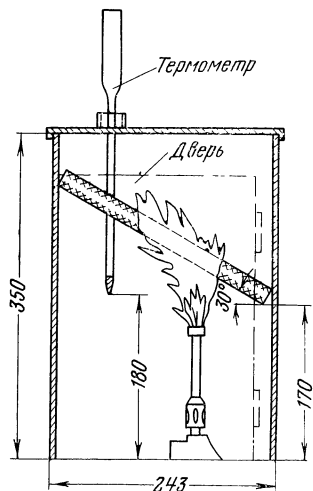


Рис. 6-1. Схема прибора для определения негорючести проводов и кабелей с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката.

туре и на одиночных образцах, принятая в ряде стран, не имитирует реальные условия эксплуатации. В радиоэлектронной аппаратуре провода обычно монтируются группами в жгутах, и при вспышке внутри аппаратуры смежные с огнем провода нагреваются быстрее, поскольку воспламенение и скорость горения в основном зависят от присутствия паров пластификаторов. Поэтому испытания на негорючесть проводов с изоляцией из поливинилхлорида предполагается производить на подогретых образцах.

По предложенной методике испытания проводятся с помощью специального прибора (рис. 6-1), представляю-

щего собой металлический шкаф без дна с верхней крышкой, которая может открываться на шарнирах. На одной стенке шкафа имеется дверца, а на противоположной устанавливается полка для поддержания образцов. Крышка шкафа снабжена отверстием для термометра, диапазон измерений которого должен быть 10—200 °С. Для подогревания образцов шкаф помещают открытым основанием на электрическую плиту или любой другой источник тепла. Поджигание образцов производится с помощью лабораторной газовой горелки, имеющей сопло диаметром 9 мм. Для горелки используется бытовой газ. Пламя горелки регулируется до общей длины 10 см и конуса 5 см. Образцы провода помещаются внутри шкафа на полку, имеющую угол наклона 30° к противоположной стенке. Расстояние между соседними образцами должно составлять 5 мм, а общая ширина ряда испытываемых образцов 10 см. Затем шкаф закрывается и воздух в нем нагревается до температуры 180 °С. При этой температуре образцы выдерживаются 10 мин, затем термометр вынимается, крышка и дверца открываются и к центральной части образцов подносится пламя. Чтобы испытания были одинаково жесткими для проводов разных сечений, продолжительность приложения пламени должна зависеть от диаметра провода. Для определения времени приложения пламени предложена следующая формула:

$$T = 15 + 1,5D, \text{ сек}, \quad (6-2)$$

где  $D$  — диаметр провода, мм.

Считается, что образцы выдержали испытание, если горение продолжалось не более 30 сек после удаления пламени.

Совокупность обоих изложенных выше принципов (время горения и длина распространения пламени) положена в основу методики испытаний на негорючесть, принятой в США. По этой методике (рис. 6-2) образцы провода помещаются в шкафу вертикально, что является наиболее жестким случаем монтажа с точки зрения распространения пламени. Нижний конец провода подвергается воздействию пламени газовой горелки 5 раз в течение 15 сек с интервалами между воздействиями пламени в 15 сек. Испытания для всех проводов проводятся при нормальной температуре окружающей среды. Образец считается выдержавшим испытание, если после

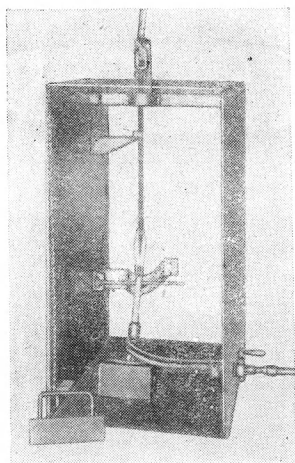


Рис. 6-2. Прибор для определения негорючести по методике, принятой в США.

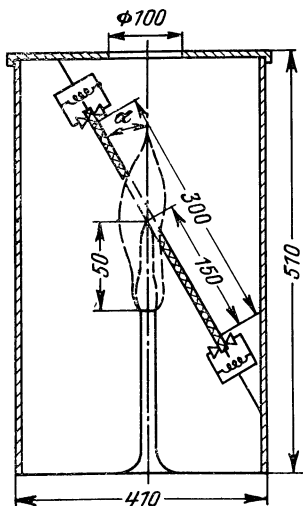


Рис. 6-3. Схема установки для испытания монтажных проводов на негорючесть.

указанных воздействий пламени он горит не более 1 мин.

Описанные выше методики испытаний в основном относятся к проводам больших сечений (до  $25 \text{ мм}^2$ ). Поскольку диапазон сечений монтажных проводов значительно ниже, необходимо было определить, в какой мере указанные методики могут быть применимы для этой группы кабельных изделий. Отработка методики испытания монтажных проводов на негорючесть заключалась в выборе критерия негорючести, угла установки образцов относительно вертикали, расстояния образца от пламени воздействия пламени. Исследования проводились на установке, схема которой показана на рис. 6-3.

В установке использовалась газовая горелка с диаметром сопла 9 мм; в качестве горючего применялся бытовой газ. Положение образца провода выбиралось из соображения наиболее жесткого воздействия пламени. Это воздействие оценивалось двумя факторами: временем до воспламенения образца и временем до его погасания после удаления пламени. В качестве образцов использовались экранированные провода с изоляцией из полиэтилена низкой плотности сечением  $0,5 \text{ мм}^2$ . Применение экрана необходимо для увеличения времени до воспламенения образцов, так как для неэкранированных образцов это

время составляет всего несколько секунд, что не позволяет производить оценку наиболее жестких условий испытаний. Длина образцов составляла 300 мм. Одновременно учитывалось влияние положения образца в пламени (расстояние до горелки). Результаты экспериментов приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

Угол положения образца	Расстояние до горелки, см	Время до воспламенения, сек	Время до погасания, сек	Примечание
90°	5	40	1	—
90	4	40	1—2	—
90	3	50	1	—
60	5	30	1—2	—
60	4	25	1—2	—
30	5	15	1—2	—
30	4	20	—	} сгорел полностью
30	3	20	—	
30	2	20	—	
0	0	25	—	
0	0	25	—	
0	0	15	—	
0	0	20	—	

На основании полученных данных можно сделать вывод, что для углов 0—30° действие пламени практически одинаковое и достаточно жесткое. Был выбран угол положения образца, равный 30°, так как при вертикальном положении при времени воздействия пламени 1—1,5 мин обугливается значительная часть изоляции, что не позволяет правильно оценить фактор распространения пламени. Длина пламени была принята равной 100 мм, а длина темного конуса 50 мм. Положение образца в пламени удобно фиксировать относительно темного конуса. Образец помещается в конце темного конуса (на расстоянии 50 мм от горелки). Время воздействия пламени выбрано равным 1 мин.

По принятой методике были проверены на негорючесть провода с различными типами изоляции. Критериями негорючести при этом было принято время горения после удаления пламени не более 20 сек; при этом изоляция не должна быть обуглена более чем на 2 см вверх и 3 см вниз. Разумеется, испытания на негорючесть относятся к классу конструкторских испытаний.



На основании результатов испытаний по этой методике все монтажные провода можно разделить на две группы: горючие и негорючие. К негорючим относятся провода с изоляцией из поливинилхлорида и фторопластов. Примером горючих проводов являются провода с изоляцией из полиэтилена и кремнийорганической резины.

### **6-3. Усадка изоляции**

Наложение изоляции методом экструзии, как правило, сопровождается вытяжкой изоляционного слоя. При тепловых воздействиях происходит релаксация напряжений вытянутого изоляционного материала, что при больших начальных вытяжках может привести к растрескиванию изоляции (в местах изгибов проводов) и к значительному смещению (убеганию) изоляционного слоя на концах проводов. Это явление получило название усадки изоляции.

Усадка изоляции может происходить как при монтаже провода (во время припаивания концов провода к электроэлементам), так и в процессе его эксплуатации при повышенных температурах.

Повышенная усадка изоляции создает существенные трудности при монтаже аппаратуры и может привести к растрескиванию изоляции в процессе эксплуатации и в конечном итоге к потере проводами работоспособности. В связи с этим выявилась необходимость ограничения величины усадки изоляции и периодической проверки этого параметра при производстве монтажных проводов. Так, например, стандартом США MIL-W-16878 предусмотрены испытания проводов на стойкость к усадке при длительном воздействии повышенной температуры (Heat Resistance) и на стойкость к усадке при пайке (Soldering).

Методика первого вида испытания заключается в длительном термостагировании проводов, предварительно намотанных на стержни десятикратного диаметра с последующей проверкой отсутствия трещин на поверхности изоляции и величины смещения изоляционного слоя на концах проводов.

Стойкость изоляции к усадке при пайке проверяется путем окунания защитных концов проводов на 5 сек в ванночку со свинцово-оловянистым сплавом (типа

Таблица 6-2

Вид изоляции	Максимальная рабочая температура, °C	Усадка при воздействии повышенных температур			Усадка при пайке [величина смещения (убегания) изоляции], мм
		Условия испытаний		Величина смеще- нит (убегания) изоляция, мм, не более	
		Время выдержки, ч	Темпе- рату- ра, °C		
Поливинилхлорид	105	96	150	3,2	3,2
Полиэтилен	75	48	95	3,2	Не регла- ментирована
Политетрафторэтилен	260	96	290	3,2	1,6
Кремнийорганическая резина	200	96	250	3,2	3,2
Фторированный этиленпро- пилен	200	96	250	3,2	3,2

ПОС-40), нагретую до температуры  $+320^{\circ}\text{C}$  (рис. 6-4), и последующей проверкой величины смещения изоляционного слоя и отсутствия трещин на изогнутом участке образца.

Требования по допустимой величине усадки изоляции проводов разных типов, выпускаемых в США, а также условия испытаний приведены в табл. 6-2.

Поскольку величина усадки зависит прежде всего от начальной вытяжки изоляционного материала, на которую в свою очередь влияет технологический режим изолирования, проверка усадки изоляции должна производиться на каждой партии проводов, предъявляемых в сдачу (приемо-сдаточные испытания). В условиях серийного производства это требует оперативной методики испытаний, позволяющей без задержки испытывать большое количество образцов.

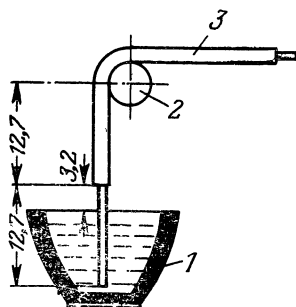


Рис. 6-4. Схема испытаний проводов на стойкость к усадке при пайке.

1 — ванна с расплавленным припоем; 2 — стержень; 3 — испытываемый образец.

Из двух рассмотренных выше методик только проверка величины усадки при пайке может обеспечить быстрый контроль качества изолирования. Эти испытания кратковременны, просты и не требуют большого количества испытательного оборудования. Что касается оценки степени усадки изоляции при воздействии повышенной температуры, то эти испытания следует производить периодически, допустим 2 раза в год, или совместить их с другими испытаниями, связанными с воздействием на провода повышенных температур (определение нагревостойкости, оценка стойкости к циклическому воздействию температур и т. д.).

Основными параметрами, влияющими на результаты испытаний проводов на стойкость к усадке при пайке, являются:

- а) время нахождения концов проводов в расплавленном припое;
- б) температура припоя;
- в) способ окунаания образцов в расплавленный припой.

Время погружения образцов в припой следует выбирать близким к времени пайки проводов, принятому при монтаже аппаратуры, которое обычно составляет 1—2 сек. Соответственно температура припоя должна быть 270—300 °C.

Оптимальный способ окунаания образцов в расплавленный припой был выбран экспериментально путем статистической обработки результатов испытаний и выбора наиболее стабильного процесса. Было рассмотрено три варианта погружения образцов в расплавленный припой — одиночное и групповое (до семи образцов) в металлическом и деревянном держателях. Сравнение

Т а б л и ц а 6-3

Окунание	Статистические параметры распределений величины смещения изоляции при пайке	
	Среднее, мм	Коэффициент вариации С
Одиночное	2,24	0,161
Групповое в металлическом держателе	0,62	0,02
Групповое в деревянном держателе	0,94	0,023

стабильности указанных способов производилось при использовании проводов с полиэтиленовой изоляцией, дающих наибольшую усадку при нагревании. Результаты сравнительных испытаний, приведенные в табл. 6-8, показывают нестабильность процесса испытаний при одиночном окутании образцов.

По-видимому, это связано с целым рядом таких субъективных факторов, как неодинаковое время выдержки и длина погружения, зависящих от испытателя.

При групповом окутании результаты испытаний более стабильны. Однако при работе с металлическим держателем, обладающим большой теплопроводностью, результаты испытаний (средняя величина смещения изоляции) существенно искажаются (0,62 мм вместо 0,94 мм при применении деревянного держателя). Поэтому для указанных испытаний целесообразно применять деревянные или текстолитовые держатели. Результаты испытаний монтажных проводов разных типов приведены в табл. 6-4.

Таблица 6-4

Тип изоляции	Полиэтилен низкой плотности	Полиэтилен высокой плотности	Поливинилхлорид	Кремний органическая резина	Фторопласты
Величина смещения изоляции при пайке, мм	0,98	0,94	0,66	0,22	Смещения изоляции не обнаружено

Необходимо отметить, что величина усадки зависит не только и не настолько от выбранного технологического процесса изолирования (конструкция технологического инструмента, температурные режимы пресса, режимы охлаждения), сколько от растягивающих нагрузок, которые могут возникнуть при изготовлении и монтаже проводов. Провода могут быть вытянуты из-за значительных натяжений при изготовлении и перемотке. При монтаже вытяжка изоляции может произойти при протаскивании проводов через узкие отверстия и в ряде других случаев. В табл. 6-5 приведены результаты испытаний проводов сечением 2,5 мм<sup>2</sup> с полиэтиленовой изоляцией, подвергнутых перемотке с разным натяжением.

Таблица 6-5

Номер образца	Величина усадки изоляции при пайке, мм, в зависимости от величины растягивающей нагрузки, кгс					
	Без нагрузки	5	10	20	40	50
1	0,93	1,2	1,8	2,4	5,0	12,0
2	0,96	1,3	1,8	2,3	4,0	11,0
3	0,94	1,4	1,9	2,5	5,0	13,0
4	0,95	1,1	2,0	2,3	5,0	11,0
5	0,94	1,2	1,8	2,4	5,0	11,0

По данным, приведенным в табл. 6-5, можно определить требования по допустимому натяжению проводов в процессе изготовления и монтажа.

Учитывая степень релаксации различных изоляционных материалов, а также неизбежные вытяжки при изготовлении и монтаже проводов, можно считать, что величина смещения изоляции при пайке не должна превышать 3 мм для проводов с полиэтиленовой изоляцией и 2 мм для остальных проводов.

## Глава седьмая

### ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ НА МОНТАЖНЫЕ ПРОВОДА И КАБЕЛИ

#### 7-1. Тепловое поле провода

Для конструктора современной радиоэлектронной аппаратуры часто бывает необходимо знать поведение провода во внешнем тепловом поле или, наоборот, знать, какие тепловые поля в условиях эксплуатации этот провод порождает.

Под тепловым полем в некоторой области  $\Omega$  понимается физическое состояние этой области, характеризующееся тем, что в каждой точке области  $\Omega$  имеется определенная температура.

Тепловое поле, не меняющееся с течением времени, называется установившимся или стационарным. Тепловое поле, которое с течением времени изменяется, называется не установившимся или нестационарным.

При исследовании тепловых полей пользуются эмпирически установленным законом, который гласит, что количество тепла, протекающего за определенный промежуток времени через плоскую стенку, прямо пропорционально разности температур, установившихся по обеим сторонам стенки, площади стенки и промежутку времени, и обратно пропорционально толщине стенки (закон Фурье). Этот закон записывается формулой

$$Q = -\lambda \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{d} \Sigma t, \quad (7-1)$$

где  $Q$  — количество тепла;  $\vartheta_1, \vartheta_2$  — установившиеся температуры на различных сторонах стенки;  $\Sigma$  — площадь стенки, через которую течет тепло;  $d$  — толщина стенки;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, зависящий от физических свойств материала стенки.

Если ввести понятия теплового сопротивления

$$S = \frac{1}{\lambda} \frac{d}{\Sigma} \quad (7-2)$$

и тепловой мощности

$$q = Q/t,$$

то закон Фурье можно записать в другой форме:

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = Sq. \quad (7-3)$$

Записанный в таком виде основной закон тепловых процессов иногда называют тепловым законом Ома по аналогии с электрическим законом Ома, в котором вместо разности температур фигурирует разность потенциалов, вместо теплового сопротивления — омическое сопротивление и вместо тепловой мощности — сила тока.

Когда по проводу течет электрический ток, электрическая энергия преобразуется в тепловую, проводник разогревается. Температура проводника может возрасти настолько, что окружающая его изоляция начнет разрушаться. Температуру, при которой начинается разрушение изоляции, будем называть критической  $\vartheta_{кр}$ . Величина тока, при которой максимальная температура на поверхности проводника достигает значения критической, принимается за предельно допустимую токовую нагрузку  $I_d$ .

Количественно переход электрической энергии в тепловую описывается законом Джоуля — Ленца, согласно которому тепловая мощность, выделяющаяся в проводнике при протекании по нему предельно допустимого тока, равна:

$$q = jI_{\pi}^2 R, \quad (7-4)$$

где  $R$  — сопротивление проводника;  $j = 0,24 \text{ кал/(вт}\cdot\text{сек)}$  — постоянная Джоуля.

Подставляя полученное значение тепловой мощности в формулу (7-3), находим величину допустимой токовой нагрузки:

$$I_{\pi} = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta_{\text{ср}}}{SR}}, \quad (7-5)$$

где  $\vartheta_{\text{ср}}$  — температура окружающей среды.

Таким образом, для определения допустимой токовой нагрузки необходимо знать тепловое сопротивление  $S$ .

Приведенные выше формулы дают возможность решать задачу определения допустимых токовых нагрузок на одиночные провода в стационарном режиме, но не позволяют изучать нестационарные тепловые поля при меняющихся во времени токовых нагрузках, а также не дают возможности изучать тепловые поля в жгутах. Для того чтобы рассматривать и эти задачи, необходимо использовать более сложные формы закона Фурье и более обстоятельное описание тепловых процессов. Такое описание возможно только с привлечением дифференциальных уравнений.

Приведенное выше понятие теплового поля в материальной области  $\Omega$ , которую в дальнейшем будем называть физическим телом, эквивалентно заданию на  $\Omega$  функции  $f(x, y, z)$ , значение которой есть температура  $\vartheta$  в точке с координатами  $x, y, z$ , лежащей внутри или на поверхности тела. Совокупность всех точек тела, в которых температура одинакова и равна  $\vartheta_1$ , представляет собой некоторую поверхность, называемую изотермической поверхностью. Будем предполагать, что рассматриваемое тело и тепловое поле в нем таковы, что все изотермические поверхности в каждой своей точке имеют нормаль. Выберем в теле две достаточно близкие точки  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$ , лежащие на одной изотермической поверхности. При этом, разлагая функ-

цию  $f(x, y, z)$ , выражающую температуру, в ряд Тейлора, получаем:

$$d\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = f(x_2, y_2, z_2) - f(x_1, y_1, z_1) = \frac{\partial f}{\partial x}(x_2 - x_1) + \\ + \frac{\partial f}{\partial y}(y_2 - y_1) + \frac{\partial f}{\partial z}(z_2 - z_1).$$

Написанное равенство можно понимать как скалярное произведение вектора перемещения  $\Delta \mathbf{r} = \{(x_2 - x_1), (y_2 - y_1), (z_2 - z_1)\}$  на вектор  $\{\partial f / \partial x, \partial f / \partial y, \partial f / \partial z\}$ , причем эти векторы оказываются ортогональными. Для выбранных точек можно считать, что вектор  $\Delta \mathbf{r}$  лежит в плоскости, касательной к изотермической поверхности, значит, второй вектор направлен по нормали к ней. Этот второй вектор называется градиентом теплового поля в точке  $(x_1, y_1, z_1)$  и обозначается, как  $\text{grad } f$  или  $\text{grad } \vartheta$ .

Выделим внутри тела  $\Omega$  произвольно ориентированную элементарную площадку, площадь которой обозначим  $ds$ , а нормаль  $\mathbf{n}$ . Будем считать, что длина вектора нормали равна единице. Выражение

$$p = (\text{grad } f, ds \mathbf{n}) \quad (7-6)$$

называется элементарным потоком градиентного поля или плотностью потока. Выражение (7-6) есть скалярное произведение двух векторов. Иногда пишут  $ds$  вместо  $ds \mathbf{n}$ .

В том случае, когда количество тепла  $Q$  меняется во времени, удобно ввести величину  $\partial Q / \partial t$ , которая называется тепловой мощностью.

С помощью введенных понятий формулируется наиболее общий закон Фурье: тепловая мощность, заключенная в объеме, пропорциональна тепловому потоку, проходящему через поверхность, ограничивающую этот объем, т. е.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \int_{\Sigma} \lambda (\text{grad } \vartheta, ds).$$

Количество тепла, запасенное в элементарном объеме  $d\omega$ , равно произведению теплоемкости на температуру и на массу этого объема, т. е. равно величине  $c\vartheta d\omega$ , где  $c$  — теплоемкость,  $\gamma$  — плотность вещества,



заполняющего объем  $d\omega$ , так что в теле  $\Omega$  запасенное количество тепла

$$Q = \int_{\Omega} c\gamma \vartheta d\omega.$$

Подставляя эту величину в предыдущее выражение, получаем:

$$\int_{\Omega} c\gamma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} d\omega = - \int_{\Sigma} \lambda (\text{grad } \vartheta ds). \quad (7-7)$$

От поверхностного интеграла с помощью теоремы Остроградского — Гаусса можно перейти к объемному, при этом  $\text{grad } \vartheta$  заменится его дивергенцией. Нетрудно показать, что

$$\text{div} (\text{grad } \vartheta) = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}.$$

В физике обычно пользуются понятием дифференциального оператора. Оператор  $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  называют оператором Лапласа и обозначают символом  $\nabla^2$ . Итак, выражение (7-7) можно привести к виду

$$\int_{\Omega} c\gamma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} d\omega = - \int_{\Omega} \lambda \nabla^2 \vartheta d\omega,$$

справедливому не только для области  $\Omega$ , но и для любой ее подобласти. Это может быть только тогда, когда равны между собой подынтегральные выражения, т. е.

$$c\gamma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \vartheta.$$

Полученное уравнение называется уравнением теплопроводности и применяется при изучении сложных тепловых явлений.

Обычно вводят еще понятие температуропроводности, называя так величину

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\gamma}, \quad (7-8)$$

и уравнение теплопроводности записывают в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \vartheta. \quad (7-9)$$

Если в объеме  $\Omega$  имеются непрерывно распределенные источники тепловой мощности, то к правой части уравнения теплового равновесия (7-7) следует добавить еще член, выражающий выделяющуюся в объеме тепловую мощность:

$$q_v = \int_{\Omega} \varphi(x, y, z, t) d\omega.$$

Тогда общее уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \vartheta + \frac{1}{c\gamma} \varphi(x, y, z, t). \quad (7-10)$$

Функция  $\varphi(x, y, z, t)$  называется плотностью тепловой мощности источников.

Уравнение (7-9) обычно называют однородным, а уравнение (7-10) — неоднородным.

Провода, тепловые поля которых мы собираемся изучать, представляют собой неограниченные осесимметричные тела. Тепловые поля в таких телах удобно рассматривать в цилиндрических координатах, направив ось  $z$  вдоль оси симметрии провода. В силу осевой симметрии характеристики поля от угловой координаты не зависят, а так как мы имеем дело с не ограниченными вдоль оси  $z$  телами, естественно предположить тепловое поле однородным, т. е. одинаковым в любом сечении координатной плоскости  $z = \text{const}$ . Тогда дифференциальный оператор Лапласа имеет вид:

$$\nabla^2 \vartheta = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r},$$

где  $r$  — радиальная координата.

Рассмотрим элементарный участок проводника длины  $dz$ . Пусть  $s$  обозначает площадь поперечного сечения, тогда объем рассматриваемого участка  $d\omega = s dz$ . Как отмечалось выше, при протекании по проводнику тока  $I$  в рассматриваемом участке выделяется тепловая мощность

$$q_v = j I^2 R. \quad (7-11)$$

Ток  $I$  можно выразить через плотность тока  $J$ . Если считать, что плотность тока в любой точке сечения проводника постоянна, то  $I = Js$ . Вводя понятие удельного

электрического сопротивления  $\rho$ , выразим величину электрического сопротивления  $R$  как  $\rho \frac{dz}{s}$ . Подставляя это в (7-11), получаем:

$$q_{\text{в}} = jJ^2 \rho s dz = jJ^2 \rho d\omega,$$

откуда находим, что плотность тепловой мощности источников

$$\varphi(r, t) = \begin{cases} jJ^2(t) \rho, & \text{если } 0 \leq r \leq a, \\ 0, & \text{если } r > a. \end{cases} \quad (7-12)$$

$a = d/2$ ;  $d$  — диаметр проводника.

Итак, в самом общем случае тепловые поля в проводниках описываются уравнением

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + \frac{1}{c\gamma} \varphi(r, t). \quad (7-13)$$

Чтобы решать уравнения в частных производных, необходимо задавать начальные и граничные условия, т. е. распределение температуры  $\vartheta_0(r)$  в начальный момент  $t=0$  и значения температуры на поверхности, ограничивающей рассматриваемое тело.

Чаще всего граничные условия либо выражают то, что на поверхности температура поддерживается постоянной:

$$\vartheta|_{\Sigma} = \text{const}, \quad (7-14)$$

либо, что на поверхности имеет место теплообмен с окружающей средой. Теплообмен выражается законом Ньютона: плотность потока тепловой мощности через граничную поверхность пропорциональна разности температур поверхности и окружающей среды. В математической формулировке этот закон выражается соотношением

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = \alpha (\vartheta - \vartheta_{\text{ср}}) \Big|_{\Sigma}, \quad (7-15)$$

где  $\frac{\partial}{\partial n}$  обозначает производную в направлении нормали к границе;  $\vartheta_{\text{ср}}$  — температура окружающей среды;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи.

В рассматриваемой осесимметричной задаче поверхность, ограничивающая тело, есть цилиндр. Направление

нормали совпадает с радиальным направлением, так что граничное условие можно записать в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial r} + h(\vartheta - \vartheta_{cp}) = 0, \quad (7-16)$$

где  $h = \alpha/\lambda$ .

Применим выведенное общее уравнение (7-13) к исследованию теплового поля одиночного провода в стационарном режиме. Будем считать, что плотность тока не зависит ни от координаты, ни от времени.

Поскольку в (7-13) свободный член, определяемый (7-12), является кусочно-постоянной функцией, естественно определять тепловые поля в проводнике и в изоляции раздельно.

Тепловое поле в проводнике описывается в стационарном режиме уравнением

$$\frac{d^2 \vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vartheta}{dr} + \frac{1}{\lambda} j J^2 \rho = 0. \quad (7-17)$$

Решение этого уравнения, удовлетворяющее граничному условию (7-14), т. е. распределение температур в проводнике, при котором температура на поверхности проводника имеет постоянное значение  $\vartheta_a$ :

$$\vartheta(r) = \frac{j J^2 \rho}{4\lambda_1} (a^2 - r^2) + \vartheta_a. \quad (7-18)$$

Здесь  $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности материала проводника.

Полученный результат показывает, что распределение температур в проводнике, нагреваемом протекающим по нему постоянным током, имеет параболический вид. Максимальная температура достигается в центре проводника и равна величине

$$\vartheta_{\max} = \frac{j J^2 \rho}{4\lambda_1} a^2 + \vartheta_a.$$

Когда сечение проводника невелико, можно считать, что температура во всем сечении постоянна и равна средней температуре

$$\bar{\vartheta} = \frac{2\pi}{\pi a^2} \int_0^a r \vartheta(r) dr = j \frac{J^2 \rho}{8\lambda_1} a^2 + \vartheta_a.$$

Стационарное тепловое поле в изоляции описывается однородным уравнением

$$\frac{d^2\vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vartheta}{dr} = 0. \quad (7-19)$$

Граница области, занятой диэлектрическим покрытием, состоит из двух частей: внутренней цилиндрической поверхности  $r=a$ , находящейся в непосредственном контакте с проводником, и наружной цилиндрической поверхности  $r=b$ , взаимодействующей с окружающей средой — чаще всего с воздухом.

В соответствии со сказанным граничные условия выберем следующим образом: на внутренней поверхности будем считать температуру постоянной, т. е. граничные условия вида (7-14)

$$\vartheta|_{r=a} = \vartheta_a,$$

а на внешней будем предполагать теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона, т. е. граничные условия вида (7-16).

Тепловое поле в изоляции определяется как решение уравнения (7-19), удовлетворяющее сформулированным граничным условиям, и представляется следующим распределением температур:

$$\vartheta(r) = \vartheta_a - \frac{h(\vartheta_a - \vartheta_{\text{ср}})}{\frac{1}{b} + h \ln \frac{r}{a}} \ln \frac{r}{a},$$

где  $h = \alpha/\lambda_2$ , а  $\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности материала изоляции.

Полученные распределения температур в проводнике, нагреваемом протекающим по нему током, и в слое изоляции, окружающей проводник, были получены независимо друг от друга. Единственно, что связывает их, это — температура  $\vartheta_a$ , устанавливающаяся на поверхности проводника, которая нам неизвестна. Оказывается, и эту температуру можно определить.

Для этого нужно обратить внимание на то, что проводник и прилегающий к нему слой изоляции находятся в непосредственном тепловом контакте. Это означает, что на поверхности контакта температуры проводника и изоляции равны, кроме того, равны и тепловые потоки.

Обозначим  $\vartheta_1(r)$  — распределение температур в проводнике,  $\vartheta_2(r)$  — распределение температур в изоля-

ционном покрытии. Математическая формулировка того, что проводник и покрытие находятся в тепловом контакте, выглядит как два условия:

$$\vartheta_1(a) = \vartheta_2(a) \text{ и } \lambda_1 \frac{d\vartheta_1}{dr} \Big|_{r=a} = \lambda_2 \frac{d\vartheta_2}{dr} \Big|_{r=a}. \quad (7-20)$$

Итак, задача сводится к тому, чтобы найти решение уравнения (7-17), т. е.  $\vartheta_1(r)$ , и решение уравнения (7-19), т. е.  $\vartheta_2(r)$  такие, чтобы были выполнены условия (7-20) и, кроме того, было выполнено условие свободного теплообмена:

$$\frac{d\vartheta_2}{dr} + h(\vartheta_2 - \vartheta_{\text{ср}}) = 0 \text{ при } r = b.$$

Такие решения можно найти, и тем самым получить распределение температур по сечению провода в целом:

$$\vartheta(r) = \begin{cases} \frac{q}{4\lambda_1}(a^2 - r^2) + \frac{q}{2\lambda_2}a^2 \left( \frac{1}{hb} + \ln \frac{b}{a} \right) + \vartheta_{\text{ср}} \\ \text{(в проводнике)} \\ \frac{q}{2\lambda_2}a^2 \left( \frac{1}{hb} + \ln \frac{b}{r} \right) + \vartheta_{\text{ср}} \text{ (в изоляции).} \end{cases} \quad (7-21)$$

Здесь  $q = jJ^2\rho$ .

Сравнивая это распределение с полученным ранее выражением (7-18), находим установившуюся температуру на поверхности проводника в проводе, работающем в условии свободного теплообмена с окружающей средой:

$$\vartheta_a = \vartheta_{\text{ср}} + j \frac{J^2\rho}{2\lambda_2} a^2 \left( \frac{1}{hb} + \ln \frac{b}{a} \right). \quad (7-22)$$

При протекании допустимой токовой нагрузки по проводнику на поверхности его установится критическая температура. Подставляя вместо  $\vartheta_a$  в выражение (7-21)  $\vartheta_{\text{кр}}$ , получаем уравнение для определения допустимого тока:

$$\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta_{\text{ср}} = j \frac{J^2\rho}{2\lambda_2} a^2 \left( \frac{1}{hb} + \ln \frac{b}{a} \right). \quad (7-23)$$

Это уравнение совпадает с уравнением теплового закона Ома (7-3). На самом деле, поскольку мы имеем

дело с постоянным током,  $J = I/\pi a^2$  и  $R = \rho/\pi a^2$ , уравнение (7-23) можно написать в виде

$$\vartheta_{кр} - \vartheta_{ср} = jI_{д}^2 R \left( \frac{1}{2\pi b h \lambda_2} + \frac{1}{2\pi \lambda_2} \ln \frac{b}{a} \right).$$

Если воспользоваться формулой (7-4) и ввести обозначение

$$S = \frac{1}{2\pi b \alpha} + \frac{1}{2\pi \lambda_2} \ln \frac{b}{a}, \quad (7-24)$$

то получится в точности уравнение (7-3) и допустимая токовая нагрузка будет определяться выражением (7-5).

В заключение заметим, что примененный здесь общий метод, кроме доказательства полной строгости формулы (7-5) для расчета допустимой токовой нагрузки, позволил получить много полезной информации. Так, было найдено распределение температур (7-21) по сечению провода, находящегося в условиях свободного теплообмена с окружающей средой, при протекании по нему электрического тока; устанавливающаяся при этом на поверхности контакта проводника со слоем изоляции температура (7-22); максимальная температура в центре токопроводящей жилы; наконец, важное соотношение (7-24), выясняющее смысл понятия теплового сопротивления.

## 7-2. Тепловое сопротивление провода

Как установлено выше, тепловое сопротивление состоит из двух частей: первая часть зависит от внешних размеров провода и коэффициента теплоотдачи, вторая часть — от относительных размеров токоведущей жилы и теплопроводности изоляции. В соответствии с этим тепловое сопротивление разбивается на тепловое сопротивление окружающей среды  $S_{окр}$  и тепловое сопротивление изоляции  $S_{из}$ . Обычно принимают следующие обозначения:

$$S_{окр} = \frac{1}{\pi D \alpha}; \quad (7-25)$$

$$S_{из} = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{D}{d}. \quad (7-26)$$

Здесь  $d = 2a$  — диаметр токоведущей жилы;  $D = 2b$  — диаметр провода по изоляции;  $\sigma = 1/\lambda_2$  — удельное тепловое сопротивление.

Оценка теплового сопротивления изоляции  $S_{из}$  не составляет труда, если известно удельное тепловое сопротивление изоляции или коэффициент теплопроводности  $\lambda_2$ . Основная трудность при расчете длительно допустимых токовых нагрузок на провода приходится на оценку теплового сопротивления окружающей среды  $S_{окр}$ , точнее — на оценку коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Обычно в условиях свободного теплообмена с окружающей средой считается, что теплоотдача происходит за счет излучения и конвекции. Так что

$$\alpha = \alpha_{л} + \alpha_{к}, \quad (7-27)$$

где  $\alpha_{л}$  — коэффициент теплоотдачи излучением;  $\alpha_{к}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи излучением  $\alpha_{л}$  определяется с помощью закона Стефана — Больцмана:

$$\alpha_{л} = \varepsilon k \frac{T_{п}^4 - T_{ср}^4}{\vartheta_{п} - \vartheta_{ср}}, \quad (7-28)$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности;  $k$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $\vartheta_{п}$  и  $\vartheta_{ср}$  — температура наружной поверхности изоляции и температура окружающей среды в обычной шкале ( $^{\circ}\text{C}$ ) соответственно;  $T_{п}$  и  $T_{ср}$  — то же, но в абсолютной шкале, К.

Методы оценки коэффициента конвекционной теплоотдачи даются в теории теплопередачи [Л. 17]. Наиболее удобный метод, позволяющий учитывать температуру и давление окружающей среды, что чаще всего приходится учитывать при установлении эксплуатационных характеристик монтажных проводов, заключается в том, что коэффициент конвекционной теплоотдачи выражается в виде

$$\alpha_{к} = \frac{\lambda_{в}}{D} \text{Nu}, \quad (7-29)$$

где  $\lambda_{в}$  — коэффициент теплопроводности воздуха при заданных температуре и давлении;  $\text{Nu}$  — термодинамический критерий Нуссельта.

В свою очередь критерий Нуссельта определяется через критерии Грасгофа  $\text{Gr}$  и Прандтля  $\text{Pr}$ :

$$\text{Nu} = c (\text{Pr Gr})^n, \quad (7-30)$$

где  $c$  и  $n$  — постоянные величины, выбираемые в зависимости от величины произведения  $\text{Pr Gr}$ .



Критерий Прандтля для воздуха очень мало зависит от температуры и давления, поэтому при практических расчетах обычно он берется постоянным и равным 0,705.

Зависимость от параметров воздушной среды критерия Грасгофа устанавливается выражением

$$Gr = \frac{D^3 \delta^2}{g \mu^2} \beta (\vartheta_n - \vartheta_{cp}), \quad (7-31)$$

где  $\delta$  — плотность воздуха;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения воздуха;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости воздуха;  $g$  — ускорение свободного падения.

Наконец, следует иметь в виду, что плотность воздуха в окрестности нагретой поверхности зависит от температуры поверхности, и эта зависимость имеет вид:

$$\delta = \frac{1,293}{760} \cdot \frac{p}{1 + 0,0036 \vartheta_{cp}}, \quad (7-32)$$

где  $p$  — давление окружающей воздушной среды, мм рт. ст.

Таким образом, формулы (7-25) — (7-32) позволяют с определенными допущениями рассчитать полное теп-

ловое сопротивление провода в зависимости от температуры и давления окружающей среды.

На рис. 7-1 приведены зависимости полного теплового сопротивления  $S$  от температуры окружающей среды при разных значениях давления, рассчитанные по приведенным выше формулам для провода марки МПМ сечением  $0,2 \text{ мм}^2$ . Конструктивные размеры провода:  $d=0,6 \text{ мм}$ ,  $D=1,15 \text{ мм}$ . Материалом изоляции служит полиэтилен, поэтому критическая температура  $\vartheta_{кр}$  принята равной  $85^\circ\text{C}$ . По оси абсцисс на рис. 7-1 откладывается приведенная температура окружающей среды

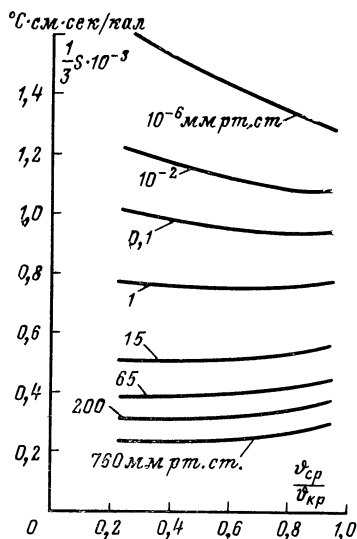


Рис. 7-1. Зависимость полного теплового сопротивления провода марки МПМ от температуры окружающей среды при различных давлениях.

$\vartheta_{\text{ср}}/\vartheta_{\text{кр}}$ , по оси ординат — масштабированное полное тепловое сопротивление. Цифры, стоящие справа против каждой кривой, обозначают давление в окружающей среде в миллиметрах ртутного столба.

Характерным для приведенных кривых является то, что, начиная с атмосферного давления до давления примерно 1 мм рт. ст., полное тепловое сопротивление с ростом температуры окружающей среды монотонно возрастает. При давлениях ниже 1 мм рт. ст. полное тепловое сопротивление убывает.

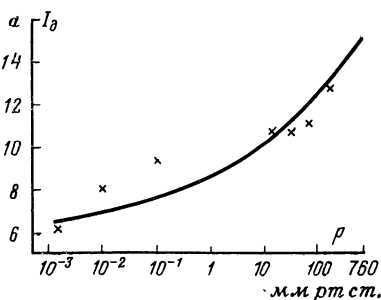


Рис. 7-2. Допустимые токовые нагрузки на провод марки МПМ в зависимости от давления.

### 7-3. Расчет длительно допустимых токовых нагрузок на одиночные провода

Длительно допустимые токовые нагрузки на одиночные провода рассчитывают по формуле (7-5), в которой величину  $S$  для различных условий окружающей среды вычисляют по формулам (7-25) — (7-32). Этот расчет довольно сложен, поэтому для выполнения его желательно использовать электронно-счетные машины.

На рис. 7-2 приведена рассчитанная кривая зависимости допустимой токовой нагрузки от давления для провода марки МПМ сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{\text{ср}} = 20^\circ\text{C}$ . Здесь же приведены экспериментально полученные значения допустимой токовой нагрузки. Критическая температура  $\vartheta_{\text{кр}}$  принималась равной  $85^\circ\text{C}$ .

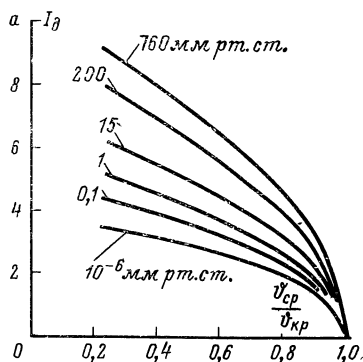


Рис. 7-3. Длительно допустимые токовые нагрузки в зависимости от температуры окружающей среды при различных давлениях.

## Длительно допустимые токовые нагрузки на монтажные провода, а

Ø пр	Р, мм рт. ст.														
	760	600	400	300	200	64	33	15	5	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>
Провод марки МПМ сечением 0,2 мм <sup>2</sup> θ <sub>кр</sub> =85 °С															
20	9,06	8,84	8,48	8,24	7,91	7,09	6,67	6,22	5,69	5,05	4,41	4,01	3,76	3,62	3,48
35	7,88	7,69	7,38	7,17	6,90	6,18	5,83	5,44	4,99	4,46	3,92	3,58	3,38	3,25	3,15
50	6,50	6,34	6,20	5,93	5,70	5,13	4,85	4,54	4,17	3,74	3,32	3,06	2,90	2,80	2,71
60	5,42	5,29	5,09	4,95	4,77	4,30	4,06	3,81	3,51	3,16	2,82	2,61	2,49	2,41	2,33
70	4,11	4,02	3,87	3,76	3,63	3,28	3,10	2,92	2,70	2,44	2,20	2,04	1,95	1,90	1,84
80	2,26	2,21	2,13	2,08	2,00	1,82	1,73	1,63	1,51	1,39	1,26	1,18	1,14	1,11	1,09
Провод марки В сечением 0,2 мм <sup>2</sup> θ <sub>кр</sub> =70 °С															
20	7,76	7,58	7,28	7,09	6,82	6,62	6,24	5,82	5,33	4,73	4,52	4,32	4,05	3,87	3,72
30	6,88	6,73	6,47	6,29	6,05	5,90	5,55	5,20	4,76	4,24	4,09	3,91	3,67	3,54	3,40
40	5,90	5,76	5,54	5,39	5,19	5,06	4,78	4,48	4,11	3,67	3,54	3,43	3,23	3,11	3,02
50	4,74	4,64	4,45	4,34	4,18	4,09	3,86	3,62	3,34	2,99	2,90	2,82	2,67	2,58	2,51
60	3,25	3,18	3,06	2,98	2,88	2,82	2,67	2,52	2,31	2,10	2,05	2,01	1,91	1,86	1,81
Провод марки ГФМ-100 сечением 0,2 мм <sup>2</sup> θ <sub>кр</sub> =200 °С															
20	14,79	14,45	13,91	13,35	13,06	12,52	12,33	11,60	10,75	9,75	8,23	7,65	7,43	7,24	7,05
60	13,05	12,78	12,31	12,00	11,58	11,12	11,00	10,42	9,69	8,86	7,55	7,09	6,92	6,76	6,61
100	11,02	10,79	10,42	10,18	9,84	9,51	9,43	8,95	8,37	7,73	6,66	6,30	6,18	6,07	5,95
130	9,18	9,01	8,71	8,60	8,26	8,01	7,96	7,58	7,13	6,63	5,74	5,48	5,40	5,29	5,21
160	6,87	6,74	6,54	6,40	6,20	6,08	6,05	5,78	5,47	5,12	4,47	4,29	4,25	4,18	4,14
190	3,31	3,25	3,16	3,10	3,02	3,00	2,99	2,88	2,74	2,59	2,30	2,22	2,21	2,18	2,17

Таблица 7-1 приведена как пример информации, получаемой в результате проведения расчета допустимых токовых нагрузок на монтажные провода по изложенной методике.

На рис. 7-3 графически представлены зависимости длительно допустимых токовых нагрузок для провода марки МПМ от температуры окружающей среды. По оси абсцисс отложены приведенные температуры. Цифры возле каждой кривой отмечают давление окружающей среды в мм рт. ст.

Наконец, на рис. 7-4 приведена плотность длительно допустимых токовых нагрузок в зависимости от диаметра токопроводящей жилы. Расчет проведен для провода марки В и в целом подтверждает хорошо известный факт, что для тонких цилиндрических тел характерен более активный теплообмен с окружающей средой, чем для толстых.

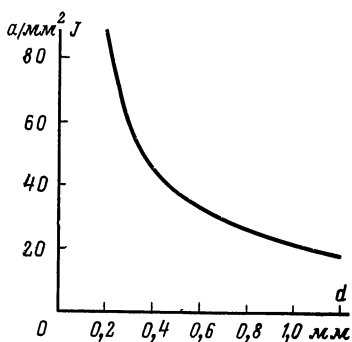


Рис. 7-4. Плотность длительно допустимой токовой нагрузки в зависимости от диаметра токоведущей жилы.

#### 7-4. Допустимые токовые нагрузки на одиночные провода в нестационарном режиме. Ампер-секундные характеристики провода

Нестационарные тепловые поля, как отмечалось выше, это — поля, меняющиеся с течением времени. Важный класс нестационарных явлений представляют собой переходные явления — явления, протекающие после включения аппаратуры до ее выхода в установившийся режим работы. Так, в проводе, который до некоторого момента времени  $t=0$  имел температуру окружающей среды  $\vartheta_{\text{ср}}$  после замыкания цепи, в которую он включен, на-

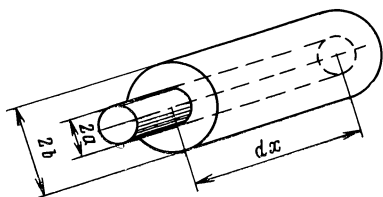


Рис. 7-5. Элементарный участок провода, рассматриваемый при выводе уравнения теплового баланса.

чинает идти ток, проводник разогревается вследствие выделения джоулева тепла и температура в каждой точке изменяется. С течением времени устанавливается равновесный теплообмен с окружающей средой, дальнейшее изменение температуры прекращается и в проводе устанавливается стационарное, не зависящее от времени распределение температур, описанное выше. Зависимость времени достижения критической температуры от величины протекающего тока называется ампер-секундной характеристикой провода.

Смотря по тому, нужно ли определять величину тока или время, на практике встречаются задачи двух видов:

1) определить время, в течение которого проводник нагревается до заданной критической температуры  $\vartheta_{кр}$  при протекании по нему тока заданной силы;

2) по заданному времени и критической температуре  $\vartheta_{кр}$  определить ток, который можно пропустить по проводнику.

Рассмотрим элементарный участок провода длины  $dx$  (рис. 7-5). Выделяющееся при протекании тока количество тепла за время  $dt$

$$dQ_B = \pi a^2 q_B dt dx, \quad (7-33)$$

где  $a$  — радиус жилы;  $q_B$ , как и прежде, определяется формулой (7-11).

Оставим в силе допущение, что проводник и окружающая его изоляция находятся в условии теплового контакта, т. е. скачки температуры на границе раздела проводника и изоляции отсутствуют.

Количество тепла, теряемое рассматриваемым участком в окружающей среде,

$$dQ_1 = 2\pi b a (\vartheta_{п} - \vartheta_{ср}) dx dt, \quad (7-34)$$

где  $\vartheta_{п}$  — температура наружной поверхности изоляции;  $b$  — радиус провода по изоляции.

Пользуясь обозначениями (7-25), (7-26), формулу (7-22), выражающую температуру на поверхности контакта изоляции с проводником, можно записать в виде

$$\vartheta_a - \vartheta_{ср} = \pi a^2 q_B (S_{из} + S_{окр}).$$

Опираясь на тепловой закон Ома, обычно принимают:

$$\pi a^2 q_B S_{из} = \vartheta - \vartheta_{п};$$

$$\pi a^2 q_B S_{окр} = \vartheta_{п} - \vartheta_{ср},$$

так что разность температуры наружной поверхности изоляции и температуры окружающей среды можно выразить как

$$\vartheta_{\text{н}} - \vartheta_{\text{ср}} = \vartheta - \vartheta_{\text{ср}} - \pi a^2 q_{\text{в}} S_{\text{из}}. \quad (7-35)$$

Обозначим  $\vartheta'$  — температуру проводника,  $\vartheta''$  — температуру изоляции. В рассматриваемой задаче нас не интересует точное распределение температуры по сечению, так что, считая проводник достаточно тонким, допускаем, что по всему сечению проводника температура постоянна.

Полное изменение количества тепла в проводнике

$$\frac{dQ'}{dt} = c_1 \gamma_1 \frac{d\vartheta'}{dt} d\omega_1,$$

а в слое изоляции

$$\frac{dQ''}{dt} = c_2 \gamma_2 \frac{d\vartheta''}{dt} d\omega_2.$$

Соответствующие элементарные объемы равны:

$$d\omega_1 = \pi a^2 dx, \quad d\omega_2 = \pi (b^2 - a^2) dx.$$

Полное изменение количества тепла в выделенном элементе провода состоит из изменения количества тепла в проводнике и изменения количества тепла в слое изоляции. Сделаем еще одно допущение: будем считать, что скорости изменения температуры в проводнике и в изоляции одинаковы, т. е.

$$\frac{d\vartheta'}{dt} = \frac{d\vartheta''}{dt}.$$

Теперь получаем, что в выделенном объеме полное изменение количества тепла

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ'}{dt} + \frac{dQ''}{dt} = \pi b^2 c \gamma \frac{d\vartheta}{dt} dx, \quad (7-36)$$

где

$$c \gamma = \frac{a^2}{b^2} c_1 \gamma_1 + \left[ 1 - \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] c_2 \gamma_2. \quad (7-37)$$

Приравнявая полное изменение количества тепла (7-36) разности изменений выделяемого протекающим током количества тепла и тепла, теряемого в окружающую среду, получаем уравнение теплового баланса

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{\text{в}}}{dt} - \frac{dQ_1}{dt}.$$

Обычно бывает удобнее рассматривать не температуру тела  $\vartheta(t)$ , а разность между нею и температурой окружающей среды:

$$u(t) = \vartheta(t) - \vartheta_{\text{ср.}}$$

В уравнении теплового баланса  $dQ/dt$  определяется из формулы (7-36),  $dQ_{\text{в}}/dt$  — из формулы (7-33), а  $dQ_1/dt$  определяется из формул (7-34) и (7-35). После подстановки этих величин и некоторых упрощений получается дифференциальное уравнение вида

$$\frac{du}{dt} = k - \kappa u, \quad (7-38)$$

где

$$k = \pi a^2 q_{\text{в}} \frac{1 + 2\pi b \alpha S_{\text{из}}}{\pi b^2 c \gamma} \quad \text{или} \quad k = \frac{a^2}{b^2} \frac{q_{\text{в}}}{c \gamma} \left( 1 + \frac{S_{\text{из}}}{S_{\text{окр}}} \right); \quad (7-39)$$

$$\kappa = \frac{2\alpha}{bc\gamma} \quad \text{или} \quad \kappa = \frac{1}{\pi b^2 c \gamma} \frac{1}{S_{\text{окр}}}.$$

При начальных условиях  $u=0$  при  $t=0$ , так, что

$$u(t) = \frac{k}{\kappa} (1 - e^{-\kappa t}). \quad (7-40)$$

При неограниченно долгом протекании тока в проводе устанавливается постоянная температура, а значит, и разность между нею и температурой окружающей среды:

$$u_{\infty} = k/\kappa.$$

Если подставить сюда выражения (7-39), получим:

$$u_{\infty} = \pi a^2 q_{\text{в}} (S_{\text{из}} + S_{\text{окр}}), \quad (7-41)$$

т. е. для установившейся температуры получим выражение, совпадающее с формулой (7-22).

Переходя снова к истинной температуре провода, выразив с помощью формулы (7-11) плотность выделяющейся тепловой мощности через силу тока, можно выразить общую зависимость температуры от времени в неустановившемся режиме в виде

$$\vartheta(t) = jI^2 RS (1 - e^{-\kappa t}) + \vartheta_{\text{ср.}} \quad (7-42)$$

где  $\kappa$  определяется по формуле (7-39).

Полученная зависимость позволяет решать обе задачи, сформулированные в начале этого раздела.

Так, в первой задаче, где требуется найти допустимое время  $t_d$ , решение получается из формулы (7-42):

$$t_d = -\frac{1}{\kappa} \ln \left[ 1 - \frac{\vartheta_{кр} - \vartheta_{ср}}{jI^2 RS} \right].$$

Во второй задаче, когда задается время  $t^*$  и требуется определить максимальный ток, который за это время нагреет провод до температуры  $\vartheta_{кр}$ , решение также сразу получается из формулы (7-42):

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{\vartheta_{кр} - \vartheta_{ср}}{jRS(1 - e^{-\kappa t^*})}}.$$

Изложенным методом можно решать разнообразные задачи.

В качестве примера рассмотрим задачу нахождения ампер-секундных характеристик проводов с изоляцией из кремнийорганической резины.

Более точно задача ставится следующим образом: по проводу, находящемуся в среде, температура которой  $\vartheta_{ср}$  и давление  $p$ , длительное время протекает ток  $I^*$ , равный допустимому току при температуре окружающей среды  $105^\circ\text{C}$  и том же давлении. В момент времени  $t=0$  возникают токовые перерывки. Требуется определить допустимое время протекания токов, превышающих  $I^*$ .

Прежде чем приступить к расчету ампер-секундных характеристик, необходимо определить установившуюся температуру на жиле, по которой длительно течет ток  $I^*$ . С учетом (7-41) находим:

$$\vartheta^* = jI^{*2}RS + \vartheta_{ср},$$

где  $S^*$  — тепловое сопротивление при температуре окружающей среды  $105^\circ\text{C}$ .

Для превышения температуры  $u$  относительно температуры  $\vartheta^*$

$$u = \vartheta - \vartheta^*$$

получается теперь задача определения зависимости превышения температуры от времени протекания тока  $I - I^*$ . Решение этой задачи

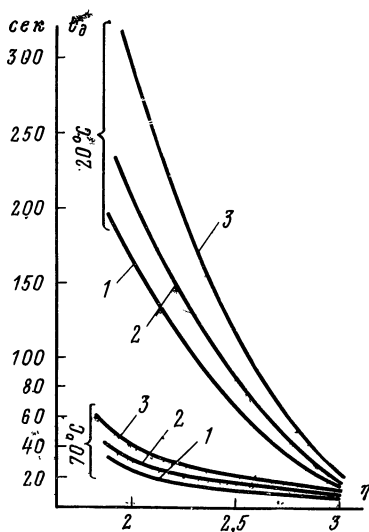


Рис. 7-6. Ампер-секундные характеристики одиночного провода при различной температуре окружающей среды.

1 — давление 760 мм рт. ст.; 2 — давление 100 мм рт. ст.; 3 — давление 5 мм рт. ст.



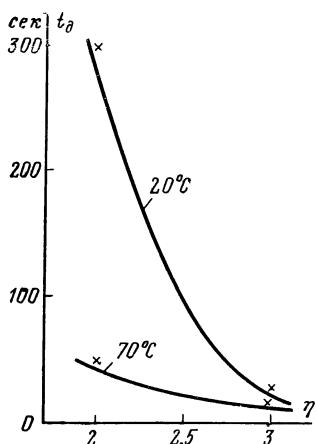


Рис. 7-7. Сравнение рассчитанных ампер-секундных характеристик с результатами эксперимента.

дается формулой (7-40), так что, принимая во внимание (7-39), имеем:

$$u(t) = jI^{*2}RS(\eta - 1)^2(1 - e^{-\eta t}),$$

где  $\eta = I/I^* \geq 1$ ;  $S$  — полное тепловое сопротивление провода при температуре окружающей среды  $\vartheta_{\text{ср}}$  и давление  $p$ .

Из этой формулы получаем зависимость температуры на токопроводящей жиле от времени

$$\vartheta(t) = jI^{*2}RS(\eta - 1)^2(1 - e^{-\eta t}) + \vartheta^*.$$

Формула для расчета требуемых ампер-секундных характеристик имеет вид:

$$t_d = -\frac{1}{\eta} \ln \left[ 1 - \frac{\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta^*}{jI^{*2}RS(\eta - 1)^2} \right].$$

На рис. 7-6 приведены рассчитанные ампер-секундные характеристики провода сечением  $0,5 \text{ мм}^2$ .

По оси абсцисс отложена величина  $\eta$ , характеризующая кратность протекающего тока относительно величины длительно допустимой токовой нагрузки при температуре окружающей среды  $105^\circ\text{C}$ , т. е.  $I^*$ , по оси ординат — допустимое время токовых перегрузок.

Таблица 7-2

**Длительно допустимые токовые нагрузки,  $a$ , на провод сечением  $0,5 \text{ мм}^2$**

Давление, мм рт. ст.	Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$		
	20	70	105
760	21,4	17,2	11,2
100	18,4	14,5	9,6
5	15,6	12,0	8,1

В табл. 7-2 даны величины длительно допустимых токовых нагрузок  $I^*$  для этого провода при температуре окружающей среды  $105^\circ\text{C}$  и указанных выше давлений.

Рисунок 7-7 иллюстрирует хорошее совпадение рассчитанных ампер-секундных характеристик с результатами экспериментов.

## 7-5. Длительно допустимые токовые нагрузки на провода, собранные в жгуты

В радиоэлектронной аппаратуре часто используют объединенные группы проводов, называемые жгутами. Как частный случай жгутов, можно рассматривать монтажные кабели, используемые иногда вместо жгутов. Входящие в конструкцию кабелей отдельные провода обычно скручивают. Скрутка может быть правильной и неправильной. При правильной скрутке можно выделить отдельные группы проводов, центры жил которых располагаются на концентрических окружностях. Группа проводов, центры жил которых лежат на одной окружности, образует повив. Скрутка производится с достаточно большим шагом, так что искривления отдельных проводов невелики; ниже этим будем пренебрегать считая, что в кабелях образующие их отдельные провода расположены параллельно. Вообще жгуты, где можно выделить отдельные группы проводов, центры токопроводящих жил которых расположены на концентрических окружностях, будем называть правильными жгутами.

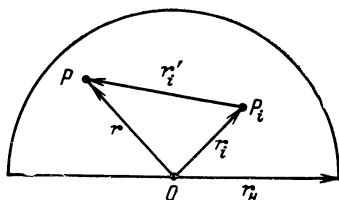


Рис. 7-8. Векторная схема к выводу формулы, описывающей тепловое поле жгута.

В дальнейшем будем пренебрегать размерами сечения токопроводящей жилы и считать, что тепловое поле жгута, возникающее, когда по токопроводящим жилам пропускается электрический ток, образуется вследствие действия точечных источников тепловой мощности, расположенных в центрах токопроводящих жил.

Будем считать, что жгут обладает осевой симметрией, поэтому уравнение, описывающее симметричное тепловое поле в нем, будем рассматривать в цилиндрических координатах, в которых ось  $z$  совпадает с осью симметрии жгута:

$$\lambda \left( \frac{d^2 \vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vartheta}{dr} \right) = F(P), \quad (7-43)$$

где  $F(P)$  — функция, описывающая действие источников тепловой мощности. Эта функция представляет собой сумму плотностей тепловой мощности всех источников тепла.

Если действие распределенных источников заменить действием точечного источника, расположенного в точке  $P_0$  на площади  $s$  и выделяющего тот же тепловой поток, то плотность его можно выразить в виде

$$q_B(P) = sq_B \delta(P - P_0),$$

где  $\delta(P)$  — обобщенная  $\delta$ -функция Дирака.

Занумеруем все отдельные составляющие жгут проводов и обозначим:  $P_i$  — центр токоведущей жилы;  $s_i$  — площадь сечения;  $J_i$  — плотность тока для отдельного  $i$ -го провода. Теперь можно написать, что в уравнении (7-43)

$$F(P) = j \sum_{i=1}^N s_i J_i^2 \delta(P - P_i), \quad (7-44)$$

где  $N$  — общее число отдельных проводов, входящих в жгут.

Уравнение (7-43) — линейное. Правая часть его в силу выражения (7-44) представляет собой сумму  $N$  слагаемых, поэтому решение уравнения (7-43) представляет собой линейную суперпозицию решений уравнений типа

$$\lambda \left( \frac{d^2 \vartheta_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vartheta_i}{dr} \right) = j J_i^2 \rho s_i \delta(P - P_i),$$

имеющих вид

$$\vartheta_i(r') = -j \frac{J_i^2 \rho s_i}{2\pi\lambda} \ln r' + C_i, \quad (7-45)$$

где  $r'$  — расстояние от точки  $P_i$ , выступающей как новый центр координат, до точки  $P$ , в которой определяется температура (рис. 7-8). Пусть в основной системе координат, начало которой совпадает с центром симметрии жгута, точки  $P_i$  и  $P$  имеют координаты  $r_i$ ,  $\varphi_i$  и  $r$ ,  $\varphi$  — соответственно. Тогда в основной системе координат температура в точке  $P$  будет выражаться формулой (7-45), в которой

$$r' = \sqrt{r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos(\varphi - \varphi_i)}. \quad (7-46)$$

Итак, тепловое поле жгута описывается распределением температуры, которое в произвольной точке  $P$ , не

совпадающей ни с одним из точечных источников, имеет вид:

$$\vartheta(P) = -\frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \ln r'_i + C^*, \quad (7.47)$$

где  $Q_i = jJ^2_i \rho s_i$ ;  $C^*$  — должно быть выбрано так, чтобы, с одной стороны, удовлетворялось граничное условие и, с другой стороны, уравнение (7.43);  $r'_i$  определяется формулой (7.46).

В качестве граничного условия, как это было выше, рассмотрим условие свободного теплообмена с окружающей средой.

Предположим, что все  $N$  источников лежат внутри некоторого круга радиуса  $r_H$  с центром в начале координат, и на границе этого круга имеет место теплообмен по закону

$$\frac{d\vartheta}{dr} + h(\vartheta - \vartheta_{cp}) = 0. \quad (7.48)$$

Из этого условия определим  $C^*$  как постоянную величину. Если допустить, что такая постоянная величина существует, то, подставляя в условие (7.48) выражение (7.47), получаем уравнение

$$-\frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \frac{r_H - r_i \cos(\varphi - \varphi_i)}{r_{Hi}^2} - \frac{h}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \ln r'_{Hi} + hC^* - h\vartheta_{cp} = 0.$$

Это уравнение зависит от переменного угла  $\varphi$ , поэтому найти из него константу  $C^*$  невозможно. Поэтому воспользуемся другим уравнением, получаемым из нашего усреднением по  $\varphi$ .

Известны значения табличных интегралов [Л. 15]:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_H - r_i \cos \psi}{r_{Hi}^2} d\psi = \frac{1}{r_H},$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln r'_{Hi} d\psi = \ln r_H,$$

использовавшись которыми, усредненное уравнение можно привести к виду

$$-\frac{1}{2\pi\lambda r_{\text{н}}} \sum_{i=1}^N Q_i - \frac{h}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \ln r_{\text{н}} + hC^* - h\vartheta_{\text{ср}} = 0,$$

откуда

$$C^* = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \left( \frac{1}{hr_{\text{н}}} + \ln r_{\text{н}} \right) + \vartheta_{\text{ср}}.$$

Таким образом, симметричное тепловое поле жгута, удовлетворяющее усредненным условиям свободного теплообмена с окружающей средой, имеет вид:

$$\vartheta(P) = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \ln \frac{r_{\text{н}}}{r'_i} + \frac{1}{2\pi r_{\text{н}} \alpha} \sum_{i=1}^N Q_i + \vartheta_{\text{ср}}. \quad (7-49)$$

В жгуте в наиболее неблагоприятных условиях находится центральная точка. Для этой точки  $r'_i = r_i$  и температура

$$\vartheta(0) = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N Q_i \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_i} + \frac{1}{2\pi r_{\text{н}} \alpha} \sum_{i=1}^N Q_i + \vartheta_{\text{ср}}. \quad (7-50)$$

Для правильного жгута, собранного по схеме 1+6+12, т. е. одна жила в центре, 6 — в первом повиве и 12 — во втором, причем ток по центральной жиле не пропускается, а жилы в первом и во втором повивах нагружены одинаковыми постоянными для каждого повива токовыми нагрузками, формула (7-50) для температуры в центре жгута принимает вид:

$$\begin{aligned} \vartheta(0) = & \frac{3}{\pi\lambda} jI_1^2 R_1 \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_1} + \frac{6}{\pi\lambda} jI_2^2 R_2 \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_2} + \\ & + j \frac{3I_1^2 R_1 + 6I_2^2 R_2}{\pi r_{\text{н}} \alpha} + \vartheta_{\text{ср}}, \end{aligned}$$

где  $r_1, r_2$  — радиусы по центрам жил первого и второго повивов;  $I_1, I_2$  — токи.

Наконец, когда правильный жгут составлен из одинаковых проводов, каждый из которых несет одну и ту же нагрузку,

$$\vartheta(0) = j \frac{I^2 R}{2\pi} \left( \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^m n_k \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_k} + \frac{N}{r_{\text{н}}^\alpha} \right) + \vartheta_{\text{ср}}, \quad (7-51)$$

где  $m$  — общее число повивов;  $n_k$  — число жил в  $k$ -м повиве;  $r_k$  — радиус по центрам жил  $k$ -го повива;  $N$  — общее число жил:

$$N = \sum_{k=1}^m n_k.$$

Из (7-51) находим выражение для допустимого тока на элементы жгута:

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{2\pi(\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta_{\text{ср}})}{jR \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^m n_k \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_k} + \frac{N}{r_{\text{н}}^\alpha}}}. \quad (7-52)$$

Сравнивая это выражение с формулой (7-3), нетрудно заметить, что мы имеем дело с одним и тем же соотношением. Действительно, вводя полное тепловое сопротивление жгута

$$S_{\text{ж}} = \frac{j}{2\pi\lambda} \sum_{k=1}^m n_k \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_k} + \frac{N}{2\pi r_{\text{н}}^\alpha},$$

получаем формулу (7-3).

Полное тепловое сопротивление жгута  $S_{\text{ж}}$ , как и в случае одного провода, рассмотренном в § 7-2, аддитивно разделяется на  $S_{\text{кон}}$  — тепловое сопротивление конструкции (теперь удобнее пользоваться этим термином вместо прежнего термина «тепловое сопротивление изоляции») и  $S_{\text{окр}}$  — тепловое сопротивление окружающей среды. Очевидно,

$$S_{\text{кон}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{k=1}^m n_k \ln \frac{r_{\text{н}}}{r_k};$$

$$S_{\text{окр}} = \frac{N}{\pi D_{\text{ж}}^\alpha},$$

где  $D_{\text{ж}} = 2r_{\text{н}}$  — диаметр наименьшей окружности, охватывающей жгут.

Наконец, рассмотрим вопрос о выборе оптимальных токовых нагрузок в жгутах. Более аккуратно задача формулируется так. Пусть жгут состоит из  $m$  повивов, каждый  $k$ -й повив составлен из одинаковых проводов. Внутри одного повива все провода одинаковы и несут одинаковую токовую нагрузку. В различных повивах провода могут быть различными и токовые нагрузки тоже различные. Требуется найти такие токовые нагрузки на каждом повиве, при которых температура в центре жгута равна заданной величине  $\vartheta_{кр}$ , а сумма всех токовых нагрузок максимальна.

Решение этой задачи опирается на формулу (7-51), которую удобнее теперь записать в виде

$$u(0) = \sum_{k=1}^m n_k R_k \left( \frac{\sigma_k}{2\pi} \ln \frac{r_n}{r_k} + \frac{1}{2\pi r_n \alpha} \right) I_k^2. \quad (7-53)$$

(Здесь мы не пишем  $j$  — постоянную Джоуля, подразумевая, что она уже входит в  $\sigma_k$  и  $\alpha$ ).

Обозначим через  $I$  сумму всех токовых нагрузок по повивам:

$$I = \sum_{k=1}^m I_k. \quad (7-54)$$

Итак, задача состоит в нахождении таких  $I_k$ , чтобы  $u(0)$  было равно заданному значению  $\vartheta_{кр} - \vartheta_{ср}$ , а величина  $I$  была бы максимальной.

В математическом анализе выражение, подобное (7-53), трактуется как эллипсоид, а (7-54) — как плоскость, лежащая в основании правильной трехгранной пирамиды, боковые грани которой суть координатные плоскости. Таким образом, решение задачи сводится к нахождению точки касания эллипсоида (7-52) с плоскостью (7-54). Не вдаваясь в подробности решения этой задачи [Л. 3], приведем окончательные результаты.

Оптимальные токовые нагрузки по повивам определяются выражениями

$$I_k = a_k^2 / I_{\max},$$

где

$$a_k^2 = \frac{\vartheta_{кр} - \vartheta_{ср}}{n_k R_k S_k};$$

$$S_k = \frac{\sigma_k}{2\pi} \ln \frac{r_n}{r_k} + \frac{1}{2\pi r_n \alpha}.$$

# Максимальная сумма всех токовых нагрузок

$$I_{\text{макс}} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \frac{\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta_{\text{ср}}}{n_k R_k S_k}}$$

Таблица 7-3

Общее число проводов	Число повивов	Количество проводов в каждом повиве	Радиусы по центрам проводов в повивах, мм	Наружный радиус жгута, мм	$\bar{\sigma}, \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{вт}$
7	1	6 — — —	0,95 — — —	1,425	970,3
19	2	6 12 — —	0,95 1,90 — —	2,375	1027,0
37	3	6 12 18 —	0,95 1,90 2,85 —	3,325	1042,7
61	4	6 12 18 24	0,95 1,90 2,85 3,80	4,275	1049,1

Ниже приведены данные, относящиеся к жгутам из проводов марки МПМ сечением 0,12 мм<sup>2</sup>. Диаметр жилы  $d=0,45$  мм, диаметр по изоляции  $D=0,95$  мм. Конструктивные параметры жгутов приведены в табл. 7-3.

В последнем столбце таблицы приведены значения средне-взвешенного удельного теплового сопротивления  $\bar{\sigma}$ . Жгут, по нашим представлениям — цилиндр радиуса  $r_n$ , состоит из медных жил (часть пространства занята медью, удельное тепловое сопротивление которой  $\sigma_m$ ), покрытых полиэтиленовой изоляцией (часть пространства занята полиэтиленом, удельное тепловое сопротивление которого  $\sigma_n$ ), и воздуха, который заполняет промежутки между отдельными проводами жгута и имеет удельное тепловое сопротивление  $\sigma_v$ . Доля пространства, занятого каждым из трех указанных выше компонент, на единичной длине жгута равна доли площади сечения жгута, приходящейся на эти компоненты. Пусть  $\xi_m$  — доля меди,  $\xi_n$  — доля полиэтилена и  $\xi_v$  — доля воздуха, тогда средневзвешенное удельное тепловое сопротивление жгута

$$\bar{\sigma} = \xi_m \sigma_m + \xi_n \sigma_n + \xi_v \sigma_v. \quad (7-55)$$

Рисунок 7-9 наглядно показывает характерное возрастание общего теплового сопротивления жгута с ростом

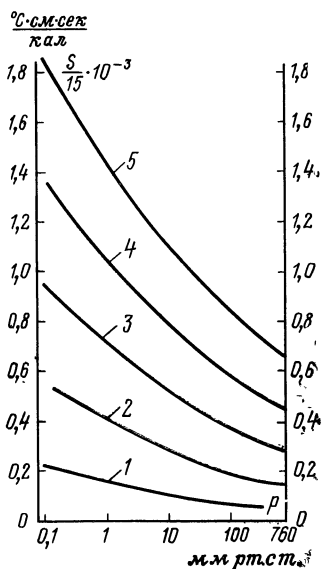


Рис. 7-9. Общее тепловое сопротивление жгутов в зависимости от диаметра окружающей среды.

1 — одиночный провод; 2 — жгут с числом проводов  $N=7$ ; 3 — то же с  $N=19$ ; 4 — то же с  $N=37$ ; 5 — то же с  $N=61$



числа проводов в нем. На рис. 7-10 приведены длительно допустимые токовые нагрузки на однородные жгуты, составленные из проводов марки МПМ. Расчет был произведен только для правильных жгутов, но может быть полезен для оценочных инженерных расчетов и неправильных жгутов, которые в первом приближении следует выполнять по линейной интерполяционной формуле:

$$I_N = I_{\hat{N}_i} - \frac{N - \hat{N}_i}{\hat{N}_{i+1} - \hat{N}_i} (I_{\hat{N}_i} - I_{\hat{N}_{i+1}}),$$

где  $\hat{N}_i$  — общее число проводов в правильном жгуте с  $i$  повивами;  $I_{\hat{N}_i}$  — рассчитанная токовая нагрузка на правильный жгут;  $N$  — общее

число проводов в жгуте ( $\hat{N}_i < N < \hat{N}_{i+1}$ );  $I_N$  — искомая токовая нагрузка.

На рис. 7-10 кусочно-линейные кривые изображены тонкой прерывистой линией.

Пусть, например, требуется оценить длительно допустимую токовую нагрузку на жгут, состоящий из 12 проводов марки МПМ се-

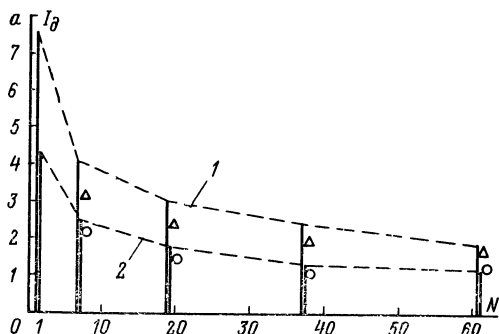


Рис. 7-10. Длительно допустимые токовые нагрузки на однородные жгуты в условиях атмосферного давления при различной температуре окружающей среды.

1 —  $t_{ср} = 20^\circ\text{C}$ ; 2 —  $t_{ср} = 60^\circ\text{C}$ ;  $\Delta$ ,  $\circ$  — значения, полученные из эксперимента.

чением  $0,12 \text{ мм}^2$  в условиях атмосферного давления и при температуре окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ .

В этом случае

$$\hat{N}_1 = 7; \hat{N}_2 = 19, I_7 = 4,12 \text{ а},$$

$$I_{19} = 2,93 \text{ а}; I_{12} = 4,12 - \frac{12 - 7}{19 - 7} (4,12 - 2,93) = 3,62 \text{ а}.$$

Сравнение расчетных значений с полученными экспериментально показывает удовлетворительное совпадение,

причем расхождения более значительные получаются для жгутов со сравнительно небольшим числом проводов (менее 37). Видимо, причиной большей погрешности для таких жгутов является грубость аппроксимации сложной боковой поверхности жгута цилиндром, которая делается при усреднении граничных условий.

## 7-6. Токовые нагрузки в жгутах в нестационарном режиме. Ампер-секундные характеристики жгутов и монтажных кабелей

Неустановившееся тепловое поле в жгуте описывается уравнением

$$c\gamma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \vartheta + F(P).$$

Функция плотности мощности тепловых источников  $F(P)$  определена формулой (7-44).

Рассматривая жгуты, следует пользоваться средне-взвешенной объемной теплоемкостью, которая представляет собой величину

$$\bar{c}\gamma = \xi_1 c_1 \gamma_1 + \xi_2 c_2 \gamma_2 + \xi_3 c_3 \gamma_3,$$

где  $\xi_1$  — доля материала проводника, приходящая на единицу длины провода;  $\xi_2$  — доля материала изоляции, а  $\xi_3 = 1 - \xi_1 - \xi_2$  — доля воздуха.

Аналогично коэффициент теплопроводности  $\lambda$  следует определять как

$$\bar{\lambda} = 1/\bar{\sigma},$$

где  $\bar{\sigma}$  — средневзвешенное удельное тепловое сопротивление жгута, определяемое формулой (7-55).

Уравнение неустановившегося теплового поля для превышения температуры можно написать в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa \nabla^2 u + \tilde{F}(P), \quad (7-56)$$

где

$$\kappa = \frac{\bar{\lambda}}{c\gamma}, \quad \tilde{F}(P) = \frac{1}{c\gamma} F(P).$$

Начальные условия

$$u|_{t=0} = 0, \quad (7-57)$$

Граничные условия

$$\frac{\partial u}{\partial r} + hu = 0 \text{ при } r = r_n, \quad (7-58)$$

где  $r_n$  — внешний радиус жгута.

Уравнение (7-56) с начальными условиями (7-57) и граничными условиями (7-58) обычно решают, представляя искомую функцию в виде суммы двух функций:

$$u(r, t) = w_1(r, t) + w_2(r, t),$$

причем  $w_1$  отыскивается как решение уравнения для установившегося теплового поля, т. е. уравнения (7-43) с граничным условием (7-58), а  $w_2$  отыскивается как решение однородного уравнения

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \kappa \nabla^2 w_2, \quad (7-59)$$

т. е. без учета источников тепла, с тем же граничным условием и с начальным условием

$$w_2(r) = -w_1(r) \text{ при } t=0.$$

Метод нахождения  $w_1$  подробно изложен в предыдущем разделе. Для определения функции  $w_1$  в общем виде следует взять формулу (7-49).

Поскольку функция  $w_1(r)$  известна, обозначим ее как  $f(r)$ . Для нахождения  $w_2(r, t)$  получается теперь классическая задача: найти решение уравнения (7-59), удовлетворяющее граничному условию

$$\frac{\partial w_2}{\partial r} + hw_2 = 0 \text{ при } r = r_n,$$

имеющее заданное начальное распределение

$$w_2 = f(r) \text{ при } t=0.$$

Решение этой задачи для цилиндра хорошо известно (см., например, [Л. 22]) и имеет вид:

$$w_2(r, t) = \frac{2}{r_n^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_n^2 t} \frac{\alpha_n^2 J_0(\alpha_n r)}{(h^2 + \alpha_n^2) J_0^2(\alpha_n r_n)} \times \\ \times \int_0^{r_n} r f(r) J_0(\alpha_n r) dr, \quad (7-60)$$

где  $J_0(x)$  — функции Бесселя первого ряда нулевого порядка, а  $\alpha_n$  — корни трансцендентного уравнения

$$xJ'_0(x) + \nu J_0(x) = 0, \quad (7-61)$$

при  $x = \alpha r_H$  и  $\nu = r_H h$ .

Формула (7-60) такова, что при  $t=0$   $w_2(r, 0) = f(r)$ ; при  $t \rightarrow \infty$   $w_2(r, t) \rightarrow 0$ . В силу этого ясно, что

$$w_2(r, t) \leq f(r). \quad (7-62)$$

В случае, когда  $f(r) = f_0(\text{const})$ , формула (7-60) упрощается и может быть приведена к виду

$$\tilde{w}_2(r, t) = \frac{2hf_0}{r_H} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_n^2 t} \frac{J_0(\alpha_n r)}{(h^2 + \alpha_n^2) J_0(\alpha_n r_H)}. \quad (7-63)$$

Если в выражение (7-60) в качестве  $f(r)$  подставить превышение температуры  $u(r)$ , определяемое с помощью формулы (7-49), то  $w_2(r, t)$  можно понимать как распределение температуры в остывающем при свободной конвекции жгуте, после того как прекратили в момент времени  $t=0$  выделять тепловую энергию источники, под воздействием которых в жгуте установилось начальное распределение температур с перегревом  $u(r)$ .

Выше отмечалось, что в жгуте в наиболее неблагоприятных условиях находится центральная точка. При длительном действии источников тепла в ней устанавливается превышение температуры  $u(0)$ , определяемое из формулы (7-50). Если пренебречь различием температур в центральной точке и в точках, лежащих на периферии жгута, и считать, что по всему сечению жгута устанавливается одинаковое превышение температуры, равное температуре в центре, то, подставляя  $u(0)$  вместо  $f_0$  в формулу (7-63), получим распределение температуры  $w_2(r, t)$  в остывающем при свободной конвекции жгуте, после того как прекратили в момент времени  $t=0$  действовать тепловые источники, под воздействием которых в жгуте установилось постоянное начальное распределение превышения температуры  $u(0)$ .

Полученные нами формулы позволяют оценить величину погрешности, появляющейся вследствие замены начального распределения температур  $\vartheta(r)$  равномерным распределением  $\vartheta(0)$ . Используя формулы (7-60) и (7-63), можно получить:

$$|w_2(r, t) - \tilde{w}_2(r, t)| \leq w_{\Delta\vartheta},$$

где  $w_{\Delta\vartheta}$  определяется формулой (7-60), в которой вместо  $f(r)$  стоит величина

$$\Delta\vartheta = |\vartheta(r) - \vartheta(0)|.$$

Подставляя сюда выражения (7-49) и (7-50), получаем:

$$\Delta\vartheta = \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \left| \sum_{i=1}^N Q_i \ln \frac{r_i}{r'_i} \right|,$$

где  $r'_i$  определяется формулой (7-46).

Для оценки погрешности в случае правильных однородных жгутов можно пользоваться формулой

$$\Delta\vartheta = \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} Q \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{4m}{(2m+1)^2} \ln 2m + \frac{2m-1}{2m+1} \right], \quad (7-64)$$

где  $Q$  — средняя тепловая мощность, приходящаяся на жгуте на один провод;  $m$  — число повивов.

Подставляя в выражение для  $w_{\Delta\vartheta}$  вместо  $\Delta\vartheta$  заведомо большую величину, стоящую справа в неравенстве (7-64), получим аналогично (7-62), что

$$|w_2(r, t) - \tilde{w}_2(r, t)| < \Delta\vartheta.$$

В тех случаях, когда полученная оценка показывает, что при допущении о равномерном по сечению жгута начальном распределении температур обеспечивается достаточная для инженерных расчетов точность, можно считать, что нестационарное тепловое поле жгута описывается распределением температур, являющимся суммой функции  $w_1(r)$ , которая определяется формулой (7-49), и функции  $w_2(r, t)$ , которая определяется формулой (7-66), где  $f_0 = -w_1(0)$ . Итак, перегрев

$$u(r, t) = u_{уст}(r) - u_{уст}(0) \frac{2h}{r_H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_n r)}{(h^2 + \alpha_n^2) J_0(\alpha_n r_H)} e^{-\alpha_n^2 t},$$

Превышение температуры в точке, находящейся в наиболее тяжелых условиях в жгуте, в центре, изменяется, следовательно, с течением времени по закону

$$u(0, t) = u_{уст}(0) \left[ 1 - \frac{2h}{r_H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_n^2 t}}{(h^2 + \alpha_n^2) J_0(\alpha_n r_H)} \right], \quad (7-65)$$

где  $u_{уст}(0)$  определяется по формуле (7-50).

Задача определения допустимых токовых нагрузок в простейшем случае однородного правильного жгута, когда по каждому из составляющих его проводов течет одинаковый ток, решается с помощью формулы (7-65) подстановкой в ее левую часть величины

$$u_{кр}(0, t^*) = \vartheta_{кр} - \vartheta_{ср}$$

и в ее правую часть в соответствии с формулой (7-51)

$$u_{уст}(0) = I_{\pi}^2 R \left( \frac{\sigma}{2\pi} \sum_{k=1}^m n_k \ln \frac{r_{\pi}}{r_k} + \frac{N}{2\pi r_{\pi} \alpha} \right).$$

Таким образом, вводя понятие обобщенной экспоненты

$$\varepsilon(t) = \frac{2h}{r_{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_n^2 t}}{(h^2 + \alpha_n^2) J_0(\alpha_n r_{\pi})} \quad (7-66)$$

и полного теплового сопротивления жгута

$$S_{ж} = \frac{\sigma}{2\pi} \sum_{k=1}^m n_k \ln \frac{r_{\pi}}{r_k} + \frac{N}{2\pi r_{\pi} \alpha},$$

получаем формулу для расчета допустимых токовых нагрузок на правильные однородные жгуты, при которых за время  $t^*$  в центре жгута установится предельно допустимая температура  $\vartheta_{кр}$ :

$$I_{\pi} = \sqrt{\frac{\vartheta_{кр} - \vartheta_{ср}}{RS_{ж} [1 - \varepsilon(t^*)]}}.$$

Формула эта аналогична формуле, полученной для одиночного провода.

Расчет ампер-секундных характеристик жгутов весьма сложен, так как оказывается невозможным получить для определения допустимого времени протекания тока  $t_{\pi}$  конечную формулу и приходится время определять непосредственно из уравнения (7-65), решая его относительно  $t$  графически или численными методами. Метод расчета будет понятен из приводимого ниже примера.

Рассмотрим монтажный кабель, который представляет собой правильный однородный жгут, состоящий из 19 проводов, каждый из которых имеет медную токопроводящую жилу диаметра 0,9 мм (сечение 0,5 мм<sup>2</sup>), покрытую изоляцией из фторопласта 40Ш. Диаметр отдельного провода по изоляции 1,4 мм. Все 19 проводов скручены в кабель двумя правильными повивами. Поверх скрученных проводов наложена оболочка из кремнийорганической резины толщиной 2,0 мм. Диаметр кабеля по оболочке равен 11,2 мм.

Двенадцать изолированных жил из 19 разделены на три группы по 4 жилы в каждой. Каждая группа передает номинальный ток 50 а. Остальные 7 изолированных жил нагружены током 5 а каждая.

Требуется рассчитать ампер-секундные характеристики этого кабеля, работающего при температуре окружающей среды 20 °С и нормальном атмосферном давлении. За допустимое время считается время, в течение которого температура проводника достигнет 300 °С.

Свойства материалов, которые встречаются в конструкции кабеля, необходимые для определения средневзвешенных теплофизических характеристик кабеля, приведены в табл. 7-4.

Т а б л и ц а 7-4

Материал	Объемная доля $\xi$	Удельное тепловое сопротив- ление $\sigma$ °С·см/вт	Удельная теплоем- кость $c$ , кал/(°С·г)	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>
Медь	0,096	4,5	0,094	8,9
Фторопласт 40Ш	0,200	472	0,25	2,22
Кремнийорганическая резина	0,478	256	0,33	1,2
Воздух	0,217	3456	0,241	0,0013
Средневзвешенные характе- ристики	—	1042,8	0,269	1,877

Средневзвешенная температуропроводность кабеля

$$\kappa = \frac{j}{\sigma \gamma} = \frac{0,24}{1042,8 \cdot 0,269 \cdot 1,877} = 4,55 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{сек}.$$

Далее по формулам (7-25)—(7-32) находят коэффициент теплоотдачи с поверхности кабеля в окружающую среду

$$\alpha = 14,06 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/(\text{°С} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек})$$

и величину  $h$ :

$$h = \frac{\alpha}{\lambda} = j \alpha \bar{\sigma} = 0,24 \cdot 14,06 \cdot 10^{-4} \cdot 1042,8 = 6,109 \text{ 1/см}$$

В номинальном режиме по каждой из трех четверок изолированных жил кабеля пропускают ток 50 а, значит, по одиночной жиле течет ток силой  $I_1=12,5$  а. По каждой из остающихся жил течет ток силой  $I_2=5$  а. Таким образом, все изолированные жилы кабеля делятся на две группы. В каждой жиле первой группы выделяется тепловая мощность  $Q_1$ , в каждой жиле второй группы  $Q_2$ :

$$Q_1 = I_1^2 \frac{\rho}{s} = (12,5)^2 \frac{3,835 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 119,84 \cdot 10^{-3} \text{ вт}.$$

$$Q_2 = I_2^2 \frac{\rho}{s} = (5)^2 \frac{3,835 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 19,175 \cdot 10^{-3} \text{ вт}.$$

Рассматриваемый кабель состоит из двух повивов. Радиус по центрам жил первого повива  $r_1=0,14$  см, радиус по центрам жил

второго повива  $r_2=0,28$  см. Жилы первой группы, несущие более высокие токовые нагрузки, расположены на периферии жгута, образуя второй повив.

Ампер-секундную характеристику будем рассчитывать, предполагая, что токи выше номинального могут протекать только по изолированным жилам первой группы, а токи во второй группе жил остаются постоянными.

Температуру, устанавливающуюся в центре кабеля при длительном протекании по каждой изолированной жиле токов  $I_1, I_2$ , определяем по формуле (7-50):

$$\vartheta_{уст}(0) = 7 \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} Q_2 \ln \frac{r_H}{r_1} + 12 \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} Q_1 \ln \frac{r_H}{r_2} + \\ + 7 \frac{Q_2}{2\pi r_H H} + 12 \frac{Q_1}{2\pi r_H H} + \vartheta_{ср}.$$

Ток  $I$  принимается кратным номинальному току  $I_1$ :

$$I = nI_1, \quad n = 1, 2, 3...$$

Отметим, что при расчете  $u_{уст}(0)$  постоянными остаются величины

$$\vartheta'_2 = 7 \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} Q_2 \ln \frac{r_H}{r_1} = 30,88^\circ \text{C}; \quad \vartheta''_2 = 7 \frac{Q_2}{2\pi r_H \alpha} = 6,51^\circ \text{C}.$$

Время  $t^*$ , в течение которого температура в центре жгута достигнет значения предельно допустимой  $\vartheta_{кр}$ , находится из уравнения (7-65). Это уравнение удобнее записать в виде

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{u_{кр}}{u_{уст}}.$$

Результаты расчета устанавливающегося превышения температуры  $u_{уст}$  и отношения  $u_{кр}/u_{уст}$  приведены в табл. 7-5.

Таблица 7-5

Кратность нагрузок $n$	Величины, входящие в превышение темпе- ратуры, °C		Превышение температуры $u_{уст}$ , °C	Величина $u_{кр}/u_{уст}$	Величина $1 - \frac{u_{кр}}{u_{уст}}$
	$\vartheta'_2$	$\vartheta''_2$			
2	662	279	978	0,2863	0,7137
3	1 489	628	2 154	0,1300	0,8700
4	2 647	1 116	3 801	0,0736	0,9264
5	4 136	1 744	5 918	0,0473	0,9527
6	5 956	2 512	8 505	0,0329	0,9671
7	8 106	3 419	11 562	0,0242	0,9758
8	10 588	4 465	15 091	0,0182	0,9818
9	13 401	5 651	19 089	0,0146	0,9854
10	16 544	6 977	23 558	0,0119	0,9881

Теперь осталось рассчитать по формуле (7-66) обобщенную экспоненту  $\varepsilon(t)$ . Параметр  $\nu$  в характеристическом уравнении (7-61) в рассматриваемом случае

$$\nu = r_H h = 3,42.$$



Таблица 7-6

Порядко- вый номер корня $n$	1	2	3	4	5	6
Корень $x_n$	0,7907	3,9197	7,0641	10,2070	13,3493	16,4941
Величина $\alpha_n$	1,4120	6,9995	12,6145	18,2268	23,8380	29,4489

Корни уравнения (7-61) и значения величин  $\alpha_n$ , входящих в формулу (7-66), с помощью которой определяется обобщенная экспонента, найдены по данным [Л. 52] и приведены в табл. 7-6.

На рис. 7-11 дан график рассчитанной обобщенной экспоненты  $\varepsilon(t)$ . Тонкой прерывистой чертой нанесена кривая, получающаяся в том случае, если в формуле (7-66) бесконечный ряд заменить только одним первым членом. Из рисунка видно, что удовлетворительной аппроксимации обобщенной экспоненты обычной экспонентой в интервале сравнительно небольших значений допусти-

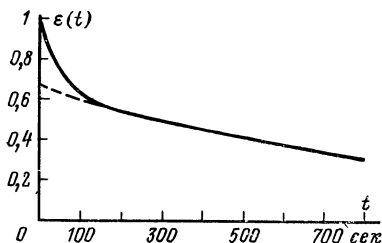


Рис. 7-11. Обобщенная экспонента в задаче определения ампер-секундных характеристик монтажного кабеля.

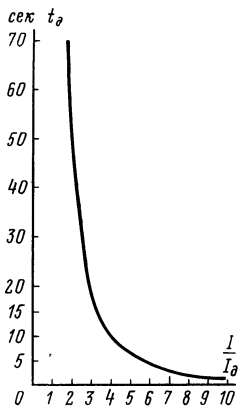


Рис. 7-12. Ампер-секундная характеристика монтажного кабеля.

мого времени протекания токов, которые соответствуют значительным токовым перегрузкам, построить невозможно, в то время как в интервале больших значений допустимого времени, которые соответствуют малым токовым нагрузкам (в нашем случае менее двухкратной), такая аппроксимация вполне удовлетворительна.

Откладывая на оси ординат значения  $1 - u_{кр}/u_{уст}$ , приведенные в табл. 7-5, проведем прямые до пересечения с графиком функции  $\varepsilon(t)$ . Соответствующая каждой точке пересечения абсцисса и есть допустимое время протекания тока. Таким образом, получаем ампер-

секундную характеристику кабеля. Для рассматриваемого кабеля ампер-секундная характеристика приведена на рис. 7-12.

Наконец, отметим, что в рассматриваемом случае число повивов  $m=2$  и средняя тепловая мощность, приходящаяся на один провод в жгуте,  $Q=82,76 \cdot 10^{-3}$  вт, так что оценка погрешности, рассчитываемая по формуле (7-64), дает  $\Delta\theta=8,5^\circ\text{C}$ . Это вполне приемлемая для инженерных расчетов величина. Очевидно, что в нашем случае применение для расчета ампер-секундных характеристик кабеля формулы (7-65) допустимо.

## Глава восьмая

### НАДЕЖНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И СОХРАНЯЕМОСТЬ

#### 8-1. Основные понятия

В процессе хранения, монтажа и эксплуатации монтажные провода подвергаются различным электрическим, механическим, климатическим и другим воздействиям. Характер каждого из этих воздействий был показан выше. На практике провода, как и другие элементы аппаратуры, испытывают одновременное воздействие различных факторов, что, естественно, ужесточает условия их эксплуатации. Так, монтажные провода, как правило, подвергаются одновременному воздействию напряжения, повышенной или пониженной температуры, продавливающих, ударных и вибрационных нагрузок и т. д.

Таким образом, реальные условия эксплуатации монтажных проводов характеризуются сложным комплексом различных воздействий, состав, последовательность и продолжительность которых могут быть самыми разнообразными. Результатом этих комплексных воздействий является постоянное снижение исходных электрических характеристик проводов вплоть до потери ими своей работоспособности (обрыв токопроводящих жил, пробой изоляции или снижение величины сопротивления изоляции за допустимые пределы). Скорость снижения этих характеристик зависит как от интенсивности различных эксплуатационных воздействий, так и от их состава и последовательности. Период времени с момента изготовления провода до момента потери им работоспособности при заданных условиях монтажа и эксплуатации называется сроком службы.

Срок службы, выражаемый в часах, является количественной мерой одной из важнейших характеристик монтажных проводов — долговечности.

Под долговечностью проводов понимается их свойство сохранять работоспособность в течение определенного периода времени. Поскольку монтажные провода используются в качестве элементов радиоэлектронной аппаратуры, их долговечность должна быть сравнимой с долговечностью других элементов и всей аппаратуры в целом. В зависимости от назначения аппаратуры требования по сроку службы монтажных проводов лежат в пределах от нескольких десятков до 100 000 ч.

При определении срока службы мы рассматривали случай, когда провода после получения потребителем сразу монтируются в аппаратуру и непрерывно эксплуатируются в ней в рабочих режимах вплоть до потери работоспособности. Такой случай в принципе возможен, однако в реальных условиях эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры гораздо чаще встречаются следующие варианты:

провода, полученные потребителем, ставятся на хранение (отдельно или в составе аппаратуры) и только после определенного времени хранения непрерывно эксплуатируются в рабочих режимах;

провода, полученные потребителем, монтируются в аппаратуру и в ее составе ставятся на хранение; в процессе хранения аппаратура периодически выводится на рабочие режимы (так называемые регламентные проверки) и только в конце срока хранения непрерывно работает в рабочих режимах.

Таким образом, период времени с момента изготовления провода до момента потери им работоспособности в общем случае состоит из ресурса провода и срока его хранения.

В зависимости от назначения аппаратуры соотношение между сроком хранения и ресурсом может быть самым различным. Для аппаратуры бытового назначения (телевизоры, радиоприемники и т. д.) ресурс, как правило, существенно превышает срок хранения.

Вместе с тем существует широкий класс аппаратуры, время хранения которой соизмеримо с временем ее работы, а иногда во много раз ее превосходит. Это прежде всего относится к аппаратуре для систем разового действия (ракеты, спутники и т. д.) и систем с малым коэффициентом использования (самолеты и другие транспортные средства). К подобной аппаратуре относятся также запасные части и приборы, хранящиеся на складе.

В процессе хранения, условия которого должны быть строго регламентированы (температура, влажность, отсутствие агрессивных сред и т. д.), исходные характеристики проводов будут несколько снижаться (так называемое естественное старение).

Разумеется, интенсивность снижения электрических характеристик проводов в процессе хранения будет меньше, чем при эксплуатации в рабочих режимах, однако при больших сроках и ужесточенных условиях хранения это снижение может быть весьма ощутимым. Поэтому, помимо требований по долговечности, к монтажным проводам предъявляется требование по сохр а н я е м о с т и, т. е. способности сохранять в определенных пределах свои свойства в процессе длительного хранения. Количественно сохраняемость оценивается допустимым сроком хранения, который обычно выражается в годах. Итак, долговечность и сохраняемость монтажных проводов характеризуют допустимое время хранения и эксплуатации их в составе радиоэлектронной аппаратуры. Естественно, чем выше долговечность и сохраняемость проводов и других элементов, тем больше срок службы аппаратуры, тем эффективнее ее использование. В этом смысле указанные характеристики являются одними из важнейших характеристик монтажных проводов, повышение которых дает весьма ощутимый экономический и технический эффект.

Однако наличие гарантий со стороны разработчиков и изготовителей монтажных проводов по их сохраняемости и долговечности, к сожалению, недостаточно для утверждения, что любой отрезок провода при хранении или эксплуатации в заданных условиях не откажет, т. е. не потеряет работоспособность в пределах ресурса или хранения. Именно это обстоятельство, т. е. возможность отказов монтажных проводов в процессе хранения и эксплуатации, несмотря на гарантии по их сохраняемости и долговечности, и приводит нас к понятию надежности. То, что мы гарантируем определенную долговечность провода, еще не значит, что данный отрезок провода будет абсолютно (на 100%) надежен и что он не потеряет работоспособность в любой момент эксплуатации. Однако с помощью специальных испытаний или статистических данных по результатам эксплуатации можно определять уровень надежности проводов данной конструкции, т. е. определить вероятность их безотказной работы.

в течение заданного времени в заданных условиях эксплуатации.

Эффективность работы любой радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени зависит от ее надежности. Во многих случаях высокая надежность аппаратуры является основным условием возможности ее использования на объектах ответственного назначения.

Надежность аппаратуры существенно зависит от надежности применяемых в ней элементов, в том числе монтажных проводов. При этом следует помнить, что монтажные провода являются наиболее массовыми элементами любых радиотехнических и электронных устройств. Количество соединений, выполняемых этими проводами в отдельных видах аппаратуры может достигать нескольких десятков тысяч. Поэтому требование высокой эксплуатационной надежности относится к числу основных требований, предъявляемых к современным монтажным проводам.

## **8-2. Надежность**

### **а) Элементы теории надежности**

Фундаментальными понятиями теории надежности являются понятия надежности и отказа. Надежность — это свойство изделия сохранять работоспособность в течение заданного времени в заданных условиях эксплуатации.

Под отказом следует понимать событие, после появления которого изделие теряет свою работоспособность. Обычно различают три типа отказов технической продукции:

**прирабочные отказы**, которые, как правило, происходят из-за некачественной технологии изготовления и слабого контроля качества продукции. Прирабочные отказы могут быть сведены к минимуму путем отбраковки дефектных, нестандартных изделий в процессе испытаний или «приработки» аппаратуры и замены отказавших при этом элементов новыми хорошего качества;

**износосвые отказы**, являющиеся следствием старения проводниковых, изоляционных и защитных материалов, входящих в конструкцию изделия. В большинстве случаев отказы за счет износа можно предотвратить

путем своевременной замены износившихся элементов аппаратуры новыми, причем интервал между заменами не должен быть больше гарантированного срока службы;

внезапные отказы, свойственные периоду нормальной эксплуатации аппаратуры, которые при тщательной приработке и профилактике, собственно, и характеризуют эксплуатационную надежность изделия.

Внезапный (случайный) характер основных отказов дает основание считать, что математическим аппаратом теории надежности могут быть методы, принятые в теории вероятностей и математической статистике. К числу основных критериев, используемых для оценки надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры, относятся вероятность безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность (опасность) отказов  $\lambda(t)$ .

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в определенных условиях эксплуатации при заданной продолжительности работы отказ не наступит. Поскольку отказ элемента и его безотказная работа являются несовместимыми и противоположными друг другу событиями, то для одних и тех же условий эксплуатации и равного промежутка времени справедливо равенство

$$P(t) + Q(t) = 1, \quad (8-1)$$

где  $Q(t)$  — вероятность отказа за время  $t$ .

Статистическими оценками величин  $P(t)$  и  $Q(t)$  являются:

$$\bar{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad \text{и} \quad \bar{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (8-2)$$

где  $N_0$  — число образцов в начале испытаний;  $n(t)$  — число образцов, отказавших за время  $t$ .

Вероятность безотказной работы как количественная характеристика надежности получила широкое распространение при оценке надежности радиоэлектронной аппаратуры и ее элементов. Основными достоинствами этой характеристики являются: возможность оценки изменения надежности во времени; возможность априорного расчета надежности сложных систем по известным значениям  $P(t)$  узлов и элементов.

Интенсивностью отказов называется отношение числа отказавших образцов в единицу времени к среднему числу образцов, исправно работающих в дан-

ный отрезок времени при условии, что отказавшие образцы не восстанавливаются и не заменяются новыми.

Статистической оценкой интенсивности отказов является:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t N_{\text{ср}}}, \quad (8-3)$$

где  $N_{\text{ср}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  — среднее число образцов, исправно работающих в интервале времени  $\Delta t$ .

Типичная кривая зависимости  $\lambda(t)$  приведена на рис. 8-1. Зависимость между величинами  $\lambda(t)$  и  $P(t)$  выражается формулой

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (8-4)$$

Интенсивность отказов ( $\lambda$ -характеристика) как количественная характеристика надежности хороша тем, что позволяет четко определять характерные периоды работы

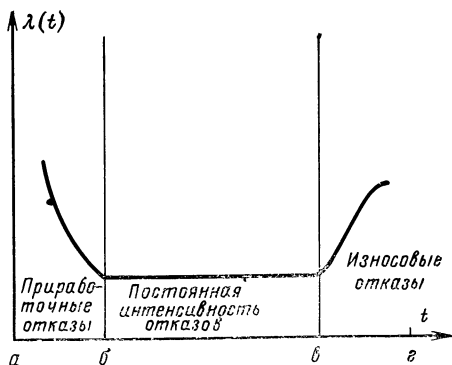


Рис. 8-1. Типичная зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации.

изделий (периоды приработки, нормальной эксплуатации и износа). Это обстоятельство помогает рационально устанавливать продолжительность приработки изделий и их ресурс до ремонта или замены.

При оценке зависимости вероятностных критериев надежности от времени чаще всего используют биномиаль-

ное распределение, распределение Пуассона, экспоненциальное распределение и распределение Вейбулла, а также нормальное и логарифмически-нормальное распределения.

По своей природе биномиальное распределение описывает появление событий, имеющих два исхода, взаимно исключающих друг друга. С его помощью можно оценить распределение во времени вероятностей появления фиксированного количества отказов в ограниченной по объему серии испытаний при условии полной независимости каждого испытания.

Пусть в одинаковых условиях производятся испытания образцов однотипных изделий  $x_1; x_2; \dots; x_i; \dots; x_n$ . Однотипность изделий дает основание считать, что вероятность отказа каждого из элементов одинакова:

$$q(x_1) = q(x_2) = q(x_i) = q(x_n) = q. \quad (8-5)$$

Тогда вероятность безотказной работы каждого элемента будет равна:

$$P(x_i) = P = 1 - q. \quad (8-6)$$

Вероятность того, что при испытаниях  $n$  элементов ровно  $k$  раз будут иметь место отказы, а  $n - k$  раз отказы не произойдут, выразится формулой

$$Q_k = C_n^k q^k p^{n-k} C_n^k q^k (1 - q)^{n-k}, \quad (8-7)$$

где  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  — число сочетаний из  $n$  по  $k$ .

Распределение Пуассона является частным случаем биномиального распределения. Оно справедливо для допущений, при которых выведено биномиальное распределение, но с условием, что  $n$  велико, а  $q$  мало. Поэтому распределение Пуассона часто называют распределением редко встречающихся событий и применяют для оценки надежности высоконадежных элементов аппаратуры. Распределение Пуассона описывается уравнением

$$Q_k = \frac{(nq)^k}{k!} e^{-nq}. \quad (8-8)$$

Экспоненциальное распределение справедливо для той же математической модели, что и распределение Пуассона, но с дополнительным условием, что  $k=0$ . Характерной особенностью этого распределения



является постоянство величины интенсивности отказов в период нормальной эксплуатации изделий ( $\lambda(t) = \text{const}$ ). Зависимость между основными характеристиками надежности по этому закону выражается формулами

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad (8-9)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (8-10)$$

В отдельных случаях для описания закона изменения надежности во времени пользуются распределением Вейбулла, имеющим вид:

$$P(t) = e^{-\lambda(t-a)^b} \quad (8-11)$$

или при  $a=0$

$$P(t) = e^{-\lambda t^b}. \quad (8-12)$$

Распределение Вейбулла дает возможность, варьируя величинами  $b$  и  $\lambda$ , менять характер зависимости  $P(t)$ , подгоняя ее к опытным данным. Нормальное и логарифмически-нормальное распределения подробно рассмотрены выше.

Любые испытания технической продукции на надежность предусматривают получение статистических оценок вероятностных критериев. Истинные (теоретические) значения вероятности безотказной работы и интенсивности отказов могут быть получены только при бесконечно большом объеме выборки, что практически неосуществимо. При многократных испытаниях одинаковых выборок однотипной продукции величины статистических оценок могут принимать различные значения. Совокупность этих величин, сгруппированных вокруг их теоретических значений, образует так называемые доверительные интервалы. При фиксированном объеме выборки ширина доверительного интервала определяет достоверность  $\alpha$  проведения испытаний. Аналогично при заданной достоверности ширина доверительного интервала определяется принятым объемом выборки.

Понятие достоверности тесно связано с принятым в теории надежности понятием риск заказчика. Риск заказчика  $\beta$  — это вероятность того, что при испытаниях на надежность будет принята партия изделий с уровнем надежности меньшим, чем это определено испытаниями. Нетрудно заметить, что

$$\beta = 1 - \alpha, \quad (8-13)$$

т. е. чем выше достоверность испытаний, тем меньше риск заказчика. Поскольку величина статистической оценки критерия надежности может попасть в любую точку доверительного интервала, то при расчете надежности с заданной достоверностью мы вынуждены использовать верхнюю [для  $\lambda(t)$ ] или нижнюю [для  $P(t)$ ] границу доверительного интервала, т. е. при расчете надежности мы в сущности определяем минимальные (или максимальные) значения вероятности безотказной работы и интенсивности отказов. Таким образом, оценка надежности всегда производится с некоторым запасом, величина которого и определяет так называемый риск изготовителя  $\gamma$ , т. е. вероятность того, что будет забракована партия изделий с приемлемым уровнем надежности. Поэтому, задаваясь величиной риска изготовителя, можно по минимальным (или максимальным) значениям критериев надежности, полученных непосредственно из эксперимента, расчетным путем определять приемлемые значения этих параметров.

Вероятностная теория надежности построена таким образом, что результаты каждого единичного опыта оцениваются по системе «да — нет», т. е. каждый образец, подвергшийся испытаниям, может оказаться плохим, не выдержавшим испытания, или хорошим. Как показано выше, такая система в общем случае описывается биномиальным распределением (8-7).

Пусть в результате  $n$  испытаний произошло  $k$  отказов. Определим при заданной достоверности  $\alpha$  доверительный интервал для оценки вероятности отказа  $q$ , т. е. найдем верхнюю  $q_v$  и нижнюю  $q_n$  границы этого интервала. Вероятность того, что при испытаниях будет иметь место  $k$  или меньше отказов равна:

$$Q_{<k} = \sum_{i=0}^k C_n^i q^i (1-q)^{n-i}. \quad (8-14)$$

Вероятность того, что при испытаниях будет иметь место не менее  $k$  отказов, составляет:

$$Q_{>k} = \sum_{i=k}^n C_n^i q^i (1-q)^{n-i}. \quad (8-15)$$

отсюда

$$1 - \sum_{i=0}^k C_n^i q_{\text{в}}^i (1 - q_{\text{в}})^{n-i} = \alpha; \quad (8-16)$$

$$1 - \sum_{i=k}^n C_n^i q_{\text{н}}^i (1 - q_{\text{н}})^{n-i} = \alpha. \quad (8-17)$$

Если вероятность появления фиксированного числа отказов распределена по закону Пуассона, то уравнения (8-16) и (8-17) будут иметь вид:

$$1 - \sum_{i=0}^k \frac{(nq_{\text{в}})^i}{i!} e^{-nq_{\text{в}}} = \alpha; \quad (8-18)$$

$$1 - \sum_{i=k}^n \frac{(nq_{\text{н}})^i}{i!} e^{-nq_{\text{н}}} = \alpha; \quad (8-19)$$

При необходимости определения доверительного интервала для вероятности безотказной работы пользуются простыми соотношениями

$$P_{\text{н}} = 1 - q_{\text{в}} \text{ и } P_{\text{в}} = 1 - q_{\text{н}}. \quad (8-20)$$

По приведенным выше формулам построены графики и таблицы [Л. 10], позволяющие определять верхние и нижние границы доверительных интервалов при заданных достоверностях и объемах выборок (рис. 8-2). По этим же графикам и таблицам можно решать и обратную задачу — определять необходимый объем выборки при заданных достоверности и вероятности безотказной работы.

При испытании на надежность высоконадежных элементов предполагаемое число отказов (так называемое приемочное число), как правило, равно нулю. Задача определения доверительного интервала для этого случая решается следующим образом [Л. 10].

Для биномиального закона распределения отказов во времени

$$P_{\text{н}} = 1 - \sqrt[n]{1 - \alpha} \quad (8-21)$$

и

$$n = \frac{\lg(1 - \alpha)}{\lg(1 - p_{\text{н}})}. \quad (8-22)$$

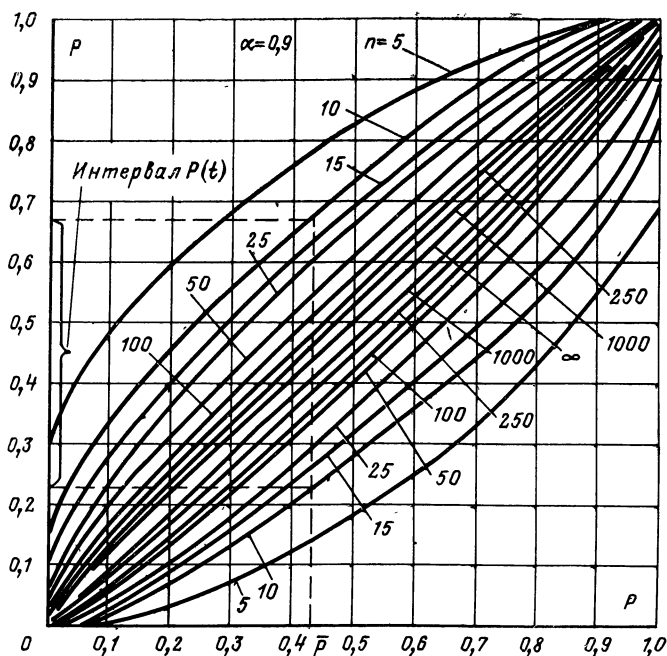


Рис. 8-2. К выбору доверительного интервала.

Для закона Пуассона

$$P_{\Pi} \approx - \frac{\ln(1 - \alpha)}{n}; \quad (8-23)$$

$$n = - \frac{\ln(1 - \alpha)}{P_{\Pi}}. \quad (8-24)$$

Накопленный опыт позволяет сформулировать основные правила планирования испытаний на надежность и дать рекомендации по расчету количественных показателей надежности. В качестве основного показателя надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры рекомендуется принимать вероятность безотказной работы  $P(t)$ . Испытание на надежность следует проводить только в тех случаях, когда

$$\frac{n}{N} \leq 0,1, \quad (8-25)$$

где  $n$  — объем выборки при испытаниях;  $N$  — объем выпуска продукции за контролируемый период.

Если закон распределения отказов во времени не известен, испытание элементов на надежность следует планировать при времени испытаний  $t_{\text{и}}$  равном гарантированному времени  $t_{\text{г}}$ . При известном законе распределения испытания можно планировать как при  $t_{\text{и}} = t_{\text{г}}$ , так и при  $t_{\text{и}} \neq t_{\text{г}}$ . В этом случае знание закона распределения отказов во времени позволяет варьировать объемом выборки, изменяя продолжительность испытаний. Планирование испытаний на надежность можно производить по одному или двум уровням. В первом случае определяется минимальное значение вероятности безотказной работы  $P_{\text{н}}$  на гарантированное время  $t_{\text{г}}$  при заданном риске заказчика  $\beta$ . Во втором, помимо этого, определяется приемлемое значение вероятности безотказной работы  $P_{\text{пр}}$  при заданном риске изготовителя  $\gamma$ . Планирование испытаний по одному уровню надежности производится следующим образом: устанавливается приемочное число  $C$  (с целью сокращения объема выборки для высоконадежных элементов  $C$  выбирается равным 0). Для случая  $t_{\text{и}} = t_{\text{г}}$  по таблицам, построенным по формуле (8-24), определяют объем выборки  $n$  [Л. 10].

В случае известного закона распределения отказов во времени, в частности, для экспоненциального закона, корректировка минимального объема выборки производится в зависимости от отношения  $t_{\text{и}}/t_{\text{г}}$ . Действительно, в соответствии с формулой (8-9)

$$P(t_{\text{и}}) = e^{-\lambda t_{\text{и}}}; \quad (8-26)$$

$$P(t_{\text{г}}) = e^{-\lambda t_{\text{г}}}, \quad (8-27)$$

откуда

$$\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{г}}} = \frac{\ln P(t_{\text{и}})}{\ln P(t_{\text{г}})}. \quad (8-28)$$

Таким образом, для изделий, предназначенных для кратковременного использования, увеличение времени испытаний может дать существенный выигрыш с точки зрения сокращения объема выборки.

При планировании испытаний по двум уровням надежности приемлемая величина вероятности безотказной работы рассчитывается по формуле

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{н}}(A+1) + (A-1)}{P_{\text{н}}(A-1) + (A+1)}, \quad (8-29)$$

где  $P_n$  — минимальное значение вероятности безотказной работы, определяемое по приведенным выше формулам;  $A$  — коэффициент, табулированный в зависимости от приемочного числа  $C$ , риска заказчика  $\beta$  и риска изготовителя  $\gamma$ .

В частности, для случая, когда  $C=0$ ,  $\beta=0,1$  и  $\gamma=0,1$  значения  $P_{пр}$  приведены ниже:

$P_n$ . . . . .	0,9	0,95	0,99	0,995	0,999
$P_{пр}$ . . . . .	0,9937	0,9976	0,9995	0,9997	0,99995

## 6) Разработка методов испытаний

Эксплуатационная надежность монтажных проводов, обеспечивается тремя основными факторами: конструкцией провода, технологией его изготовления и способом монтажа. Поскольку монтаж проводов (укладка, рихтовка и крепление жгутов, припаивание концов к электроэлементам и т. д.) производится потребителем, то задачей конструкторов и изготовителей проводов является обеспечение их конструктивной и технологической надежности.

Наиболее существенными этапами разработки методики определения конструктивной надежности монтажных проводов являются выбор параметров, подлежащих контролю, установление взаимной связи между ними, выбор состава и последовательности воздействующих факторов и, наконец, расчет минимального объема выборки, обеспечивающего заданную достоверность испытаний.

К числу наиболее жестких механических и климатических воздействий на провода в процессе монтажа и эксплуатации следует отнести многократные перегибы, изгибы при отрицательных температурах, повышенную влажность, циклы нагрева и охлаждения, а также длительное старение при максимальной рабочей температуре с одновременным воздействием продавливающих нагрузок. Примерный режим испытаний монтажных проводов на надежность приведен в табл. 8-1.

В табл. 8-1 приняты следующие обозначения:  $R$  — электрическое сопротивление жил;  $R_{из}$  — сопротивление изоляции;  $U_{исп}$  — испытательное напряжение.

Величина конструктивной надежности монтажных проводов, определяемая при их разработке, дает возможность оценить эффективность выбора материалов и конструкций элементов, а также технологического про-

Т а б л и ц а 8-1

Воздействующие факторы	Контролируемые параметры
Многократные перегибы Изгибы при отрицательной температуре Тропическая влажность Циклическое воздействие температур Повышенная температура с одновременным воздействием продавливающих нагрузок	$R, R_{из}, U_{исп}$ $U_{исп}, R_{из}$ $R_{из}$ $U_{исп}, R_{из}$ $U_{исп}, R_{из}$
Многократные перегибы Изгибы при отрицательных температурах Тропическая влажность Циклическое воздействие температур Повышенная температура с одновременным воздействием продавливающих нагрузок	$R, R_{из}$ $U_{исп}, R_{из}$ $R_{из}$ $U_{исп}$ $U_{исп}, R_{из}, R$

цесса их изготовления. При внедрении проводов в серийное производство кабельные заводы должны обеспечить их выпуск с количественными показателями надежности, не уступающими показателям, полученным при разработке.

Поскольку конструкция провода в процессе производства не меняется, то решающим условием сохранения надежности при серийном выпуске является поддержание технологии на уровне не ниже, чем при разработке, и обеспечение стабильности технологии с течением времени. Практика показывает, что последнее обстоятельство по многим причинам является наиболее уязвимым элементом любого производства.

Таким образом, необходимость количественного контроля надежности монтажных проводов со всей неизбежностью ставит вопрос об оперативном контроле стабильности технологического процесса их изготовления. Именно в этом смысле и следует понимать термин технологическая надежность монтажных проводов. В отличие от конструктивной надежности технологическая надежность должна проверяться методами экспресс-контроля на каждой партии проводов, предъявляемой к сдаче.

Вернемся к способам оценки конструктивной надежности монтажных проводов.

Принципиально возможны два варианта оценки этого параметра — а п р и о р н ы й, проводимый в процессе

разработки проводов, и апостериорный, получаемый по результатам эксплуатации этих проводов в конкретной аппаратуре.

Разумеется, априорный способ оценки количественных показателей надежности является наиболее ценным, так как позволяет выбирать оптимальные конструкции проводов и прогнозировать надежность аппаратуры в целом. Полезность апостериорной информации о надежности заключается в подтверждении полученных априорным путем данных о надежности проводов, а также в возможности использования этой информации при оценке надежности новых проводов аналогичных конструкций.

Следует отметить, что изложенная выше вероятностная теория надежности, несмотря на ее доступность и хорошо разработанный математический аппарат, все же обладает существенными недостатками, делающими невозможным ее использование для многих случаев практического применения.

В основном эти недостатки проявляются при оценке надежности высоконадежных элементов аппаратуры. Действительно, чем выше требования по надежности изделий, тем практически труднее подтвердить эту надежность из-за колоссального возрастания объема выборки. Достаточно напомнить, что для подтверждения надежности  $P_n(t_{и}) = 0,999$  при  $\alpha = 0,9$  и  $C = 0$  необходимо испытать 2 300 образцов; для  $P_n(t_{и}) = 0,9999$ —23 000 образцов; для  $P_n(t_{и}) = 0,99999$ —230 000 образцов и т. д., т. е. при увеличении требований по надежности на одну девятку минимальный объем выборки увеличивается в 10 раз.

По данным апостериорной информации эксплуатационная надежность монтажных проводов находится на уровне  $P_n(t_{и}) = 0,99999$ — $0,999999$  и ему соответствует минимальный объем выборки  $n = 230\,000$ — $2\,300\,000$  образцов. Разумеется, такое количество образцов является абсолютно неприемлемым для испытаний кабельных изделий, в том числе монтажных проводов.

С учетом особенностей кабельной продукции максимальный уровень надежности, который практически может быть подтвержден по изложенной выше методике, в лучшем случае составляет  $P_n(t_{и}) = 0,99$ , что не соответствует ни требованиям заказчиков, ни фактическому уровню надежности монтажных проводов.



В связи с этим возникает проблема — как же оценить надежность монтажных проводов в процессе разработки? По мнению авторов, в настоящее время эта проблема может быть решена двумя путями. В первом случае следует сознательно отказаться от априорной количественной оценки конструктивной надежности монтажных проводов, проводя только качественную ее оценку. При этом под качественной оценкой конструктивной надежности следует понимать проведение испытаний определенного количества образцов (допустим, 50 или 100) в последовательности, изложенной в табл. 8-1. Успешное проведение этих испытаний дает основание считать, что провода выбранной конструкции в течение заданного времени сохраняют работоспособность при воздействии наиболее жестких эксплуатационных факторов, предусмотренных техническим заданием, т. е. что испытанные провода качественно надежны. Косвенным обоснованием достоверности этих испытаний должна явиться достаточно высокая однородность разработанных проводов, т. е. стабильность всех технических характеристик по длине провода. Этим же параметром (однородностью) должна оцениваться и технологическая надежность монтажных проводов, обеспечивающая сохранение конструктивной надежности в процессе серийного производства. Подробно методы количественной оценки однородности описываются в гл. 10.

Другим возможным способом априорной оценки конструктивной надежности монтажных проводов является использование не вероятностной, а спектральной теории надежности [Л. 42].

Выше было показано, что в основу методов испытаний промышленной продукции по вероятностной теории надежности положена система «да — нет» или «годен — не годен», соответствующая биномиальному распределению или закону Пуассона, т. е. после воздействия на образцы наиболее жестких электрических, механических и климатических факторов в течение заданного времени, вся полезная информация, полученная из этих испытаний, сводится к сведениям о годности или непригодности образцов к дальнейшей эксплуатации. Ограниченность информации, полученной в результате столь длительных и дорогостоящих испытаний, и является причиной необходимости большого объема выборки, так как только за счет этого можно сделать выводы с приемлемой достоверностью. По-видимому, увеличение полезной информации, полученной в результате испытаний, могло бы привести к существенному снижению количества образцов, необходимых для достоверной оценки их надежности.

Оценка видов распределений основных параметров, определяющих работоспособность изделий, и степени их разброса после воздействия на образцы наиболее жестких эксплуатационных факторов и является основой спектральной теории надежности.

Допустим, что критерием работоспособности некоторого изделия является величина  $A$  параметра  $x$ . Пусть в заданном режиме в течение заданного времени проведены испытания  $n$  образцов изделия. При этом величина  $n$  настолько велика, что достоверность этих испытаний близка к единице. Пусть в результате испытаний обнаружено, что  $m$  образцов имеют величину параметра  $x < A$ , а  $n - m$  образцов  $x > A$ . Тогда в соответствии с (8-2)

$$\bar{P}(t_n) = P(t_n) = \frac{n - m}{n}. \quad (8-30)$$

Предположим также, что помимо оценки « $x$  меньше, равно или больше  $A$ » определены истинные значения параметра  $x$  для каждого образца:  $x_1 = a_1$ ;  $x_2 = a_2$ ; ...;  $x_i = a_i$ ; ...;  $x_n = a_n$ . Допустим, для простоты, что распределение значений  $x_i$  подчиняется нормальному закону с параметрами  $\bar{a}$  и  $\sigma$ . Тогда справедливо неравенство

$$\bar{a} - t_p \sigma \geq A, \quad (8-31)$$

где  $t_p$  — квантиль нормального распределения, соответствующая доле  $P(t) = (n - m)/n$  или

$$t_p \leq \frac{\bar{a} - A}{\sigma}. \quad (8-32)$$

Величина вероятности безотказной работы может в данном случае быть определена как:

$$P(t) = Z(t_p), \quad (8-33)$$

где  $Z(t_p)$  — функция нормального распределения.

Рассмотрим теперь результаты испытаний  $n_1$  образцов, случайно выбранных из совокупности  $n$ . Естественно, что в этом случае равенство  $\bar{P}(t_n) = P(t_n)$  мало достоверно, и оценка вероятности безотказной работы  $\bar{P}(t_{n_1}) = (n_1 - m_1)/n_1$  будет некорректной.

Однако, если закон распределения величины  $x$  в принципе известен, то вероятность безотказной работы может быть определена из соотношения (8-33) со следующими поправками. Пусть заранее известно, что величина  $x$  распределена по нормальному закону и для  $n_1$  значений этой величины получены несмещенные оценки параметров

$$\bar{a} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} a_i \text{ и } \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (a_i - \bar{a})^2}{n_1 - 1}}. \quad (8-34)$$

Величины истинных значений параметров  $\bar{a}$  и  $\bar{\sigma}$  попадают в так называемые доверительные интервалы

$$I_a(\alpha, n_1) = \bar{a} \pm \bar{\sigma} \frac{t_\alpha}{\sqrt{n_1}}; \quad (8-35)$$

$$I_\sigma(\alpha, n_1) = \left[ \bar{\sigma} \sqrt{\frac{n_1 - 1}{\chi_2^2}}; \bar{\sigma} \sqrt{\frac{n_1 - 1}{\chi_1^2}} \right]; \quad (8-36)$$

или

$$\bar{a}_{\text{мин}} = \bar{a} - \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n_1}}; \quad (8-37)$$

$$\sigma_{\text{макс}} = \sigma \sqrt{\frac{n_1 - 1}{\chi^2_2}}. \quad (8-38)$$

Тогда величину  $P_{\text{н}}(t_{\text{н}})$  можно определить как

$$P_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = Z(t'_P), \quad (8-39)$$

где

$$t'_P = \frac{\bar{a}_{\text{мин}} - A}{\sigma_{\text{макс}}}. \quad (8-40)$$

Таким образом, получение дополнительной информации о характере распределения величины определяющего работоспособность изделия параметра после полного цикла эксплуатационных воздействий позволяет отказаться от принятой в вероятностной теории на-

дежности системы «годен — не годен» и резко сократить количество образцов, необходимое для получения достоверных выводов о надежности изделия.

Необходимыми условиями для применения описанного выше упрощенного метода оценки надежности являются:

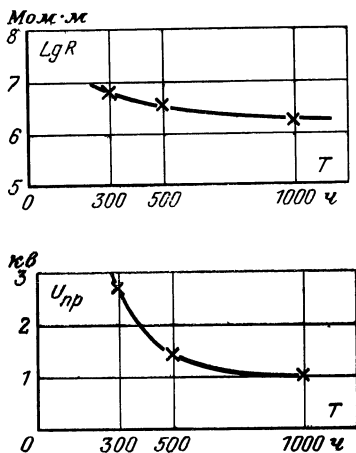
наличие одного и только одного параметра, определяющего работоспособность изделия (при двух или нескольких определяющих параметрах применение этого метода также возможно, но сопряжено с более громоздкими вычислениями);

подчинение распределения величины определяющего параметра нормальному закону как в состоянии поставки, так и после полного цикла эксплуатационных воздействий, предусмотренных методикой испытаний (следует отметить, что в принципе приемлемо и любое другое распределение определяющего параметра. Однако

Рис. 8-3. Зависимость пробивного напряжения и сопротивления изоляции монтажного провода от времени выдержки при повышенных температурах.

в этом случае доверительные интервалы для параметров распределения будут шире, а количество образцов, необходимых для достоверной оценки надежности, — существенно больше).

Как указывалось выше, основными параметрами, определяющими работоспособность монтажных проводов в условиях эксплуатации, являются электрическая прочность, сопротивление изоляции и электрическое сопротивление токопроводящих жил. Опыт исследования электрических характеристик монтажных проводов показывает, что



для современных проводов с пластмассовой изоляцией и токопроводящими жилами из защищенной медной проволоки величины сопротивления изоляции и сопротивления жил достаточно устойчивы при воздействии различных эксплуатационных факторов.

Так, на рис. 8-3 показана зависимость электрических параметров провода с полиэтиленовой изоляцией от времени пребывания при максимальной рабочей температуре с одновременным воздействием продавливающих нагрузок. Подобные же зависимости наблюдаются и при испытаниях проводов других типов. Все это дает основание считать, что основным параметром, подлежащим контролю при оценке надежности монтажных проводов, является величина пробивного напряжения. Контроль уровня сопротивления изоляции и электрического сопротивления токопроводящих жил может быть факультативным.

Таким образом, в случае монтажных проводов наличие выполнения первого условия применимости новой методики определения надежности. Что касается второго условия, то оно было подтверждено в результате испытания на надежность 230 образцов провода с изоляцией из кремнийорганической резины. Испытания проводились при суммарном времени испытаний  $t_{\Sigma} = 1000$  ч (шесть недельных циклов по 168 ч). Последовательность эксплуатационных воздействий и состав контролируемых параметров выбирались в соответствии с табл. 8-1. В результате указанных испытаний все 230 образцов выдержали испытательное напряжение  $U_{исп} = 2$  кВ, а факультативно измеряемые значения сопротивления изоляции и жилы оказались на требуемом уровне. Таким образом, приемочное число  $C$  (количество отказов) оказалось равным нулю, и в соответствии с вероятностной теорией надежности при достоверности  $\alpha = 0,9$  был подтвержден минимальный уровень вероятности безотказной работы  $P_{\Sigma}(t_{\Sigma}) = 0,99$ , что при риске изготовителя  $\gamma = 0,1$  соответствует приемлемому значению вероятности безотказной работы  $P_{пр} = 0,9995$ . Затем все образцы были испытаны при плавном подъеме напряжения до пробоя. График полигона накопленных частот значений пробивных напряжений, построенный на вероятностной бумаге, показан на рис. 8-4. Данные, приведенные на рис. 8-4, говорят о том, что распределение значений пробивных напряжений испытанных проводов близко к нормальному закону с параметрами  $\bar{U}_{пр} = 14,08$  кВ и  $\sigma = 1,44$  кВ.

Тогда по приведенным выше формулам (при  $\alpha = 0,9$ )

$$U_{мин} = \bar{U}_{пр} - \frac{\sigma t_{\alpha}}{\sqrt{n_1 - 1}} = 14,08 - \frac{1,44 \cdot 1,652}{\sqrt{229}} = 13,84 \text{ кВ};$$

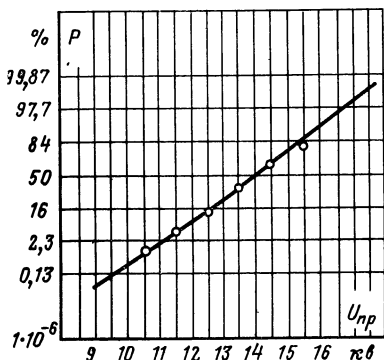


Рис. 8-4. График полигона накопленных частот значений пробивных напряжений проводов с изоляцией из кремнийорганической резины.

$$\sigma_{\text{макс}} = \sigma \sqrt{\frac{n_1 - 1}{\chi_2^2}} = 1,44 \sqrt{\frac{229}{99,3}} = 2,18 \text{ кг};$$

$$t_p = \frac{U_{\text{мин}} - 2U_p}{\sigma_{\text{макс}}} = \frac{13,84 - 1,0}{2,18} = 5,9;$$

$$P_n(t_n) = Z(t_p) = 0,9999999,$$

что, по-видимому, и соответствует истинному значению вероятности безотказной работы этих проводов. Поскольку требования по надежности монтажных проводов обычно по уровню ниже значений, полученных в указанном примере, естественно, возникает вопрос об уменьшении объема выборки. В табл. 8-2 приведены расчетные данные значений  $P_n(t_n)$  для различных объемов выборок, случайно выбранных из рассмотренной совокупности (230 образцов).

Т а б л и ц а 8-2

$n_i$	$\bar{U}_{\text{пр}},$ кг	$\bar{\sigma},$ кг	$t_\alpha$	$\chi_2^2$	$\sigma_{\text{макс}},$ кг	$U_{\text{мин}},$ кг	$t_p$	$P_n(t_n)$
5	13,7	1,58	2,13	0,711	3,88	12,2	3,07	0,9979
10	13,7	1,71	1,833	3,22	2,9	12,72	4,3	0,99997
15	13,8	1,73	1,761	6,57	2,56	13,01	4,7	0,999998
25	13,85	1,76	1,711	13,85	2,31	13,25	5,31	0,999999
30	13,9	1,54	1,679	21,6	2,23	13,53	5,42	$1-1 \cdot 10^{-7}$

Анализ данных, приведенных в табл. 8-2, говорит о том, что приемлемой величиной объема выборки для испытаний монтажных проводов на надежность по предложенному методу является 25 образцов.

Следует отметить, что при всей заманчивости и простоте указанного метода оценки надежности монтажных проводов в нем имеется одно весьма существенное узкое место — доказательство близости распределения значений пробивного напряжения образцов провода к нормальному закону. В нашем случае это доказательство строится на аппроксимации графика полигона накопленных частот, построенного на вероятностной бумаге, в прямую, что, по-видимому, недостаточно, особенно для области малых значений пробивного напряжения. Поэтому значения количественных показателей надежности, полученных по этому методу, следует принимать с осторожностью в качестве ориентировочных данных.

### 8-3. Сохраняемость

Как указывалось выше, сохраняемость — это свойство изделия сохранять заданные эксплуатационные характеристики в течение установленного срока хранения.

Принципиальными вопросами создания методики оценки сохраняемости монтажных проводов являются:

выбор критериев оценки сохраняемости и допустимой степени снижения исходных характеристик;

точное фиксирование условий хранения монтажных проводов и обобщение требований по срокам хранения;

создание ускоренных методов испытаний, позволяющих в сравнительно короткие сроки имитировать долготнее хранение проводов;

расчет оптимального объема выборки для этих испытаний, обеспечивающего требуемую надежность оценки и достоверность.

Как было показано выше, в процессе хранения монтажные провода подвергаются воздействию многих климатических факторов, определяемых условиями хранения. В результате воздействия этих факторов происходит естественное старение конструктивных элементов проводов, т. е. определенное снижение исходных электрических и других характеристик. Учитывая, что, как правило, после хранения наступает период непосредственной эксплуатации проводов в рабочих режимах, это снижение характеристик должно быть минимальным, обеспечивающим гарантированное значение долговечности. В этом смысле весьма важным является вопрос о допустимой степени снижения основных характеристик монтажных проводов после длительного хранения. Исследование этого вопроса показано, что, по-видимому, основными параметрами — критериями годности при оценке сохраняемости монтажных проводов разных типов следует принять электрическую прочность, сопротивление изоляции и морозостойкость.

Условия хранения монтажных проводов и других элементов радиоэлектронной аппаратуры принципиально можно разделить на две категории: складское хранение и хранение в полевых условиях. При складском хранении в отапливаемых помещениях провода отдельно или в составе аппаратуры хранятся в наиболее благоприятных условиях при температуре от  $+5$  до  $+35^{\circ}\text{C}$  с относительной влажностью воздуха не более 80%. При этом провода защищаются от прямого воздействия солнечных лучей, от механических воздействий и воздействия паров, кислот, щелочей, нефтепродуктов и других агрессивных сред. Таким образом, в условиях складского хранения провода подвергаются длительному воздействию комнатной температуры и сравнительно невысокой влажности.

Более жесткими являются условия полевого хранения монтажных проводов. При полевом хранении на провода могут воздействовать следующие факторы:

длительное воздействие повышенных (до  $+50^{\circ}\text{C}$ ) температур и влажности (до 98%);

сильное охлаждение (до  $-50^{\circ}\text{C}$ ) и сравнительно длительное воздействие пониженных температур;

значительный перепад температур при переходе от холодного времени года к теплому и сменах районов эксплуатации;

многократные суточные изменения температуры. Что касается гарантированных сроков хранения, то к настоящему времени, как правило, требования по сохранности элементов радиоэлектронной аппаратуры включают в 12 лет, из которых 9 лет провода должны храниться в складских условиях и 3 года — в полевых условиях.

Практически испытания монтажных проводов на сохраняемость можно было бы проводить, точно имитируя условия складского и полевого хранения в течение 12 лет, с последующей проверкой параметров — критериев годности. Однако сравнительно быстрый моральный износ радиоэлектронной аппаратуры, требующий непрерывного совершенствования всех применяемых в ней узлов и элементов, в том числе монтажных проводов, не дает возможности проводить столь длительные испытания. Поэтому особо важным является разработка методов ускоренных испытаний на сохраняемость, позволяющих сократить их продолжительность и объем. Применительно к проводам и кабелям такие методы разработаны А. Н. Дудкевичем и Л. Н. Улановской. Эти методы основаны на моделировании в лабораторных условиях процессов, протекающих в конструктивных элементах кабелей и проводов при их длительном хранении.

Как указывалось выше, основной процесс, имеющий место при складском хранении — это тепловое старение материалов, используемых в проводах.

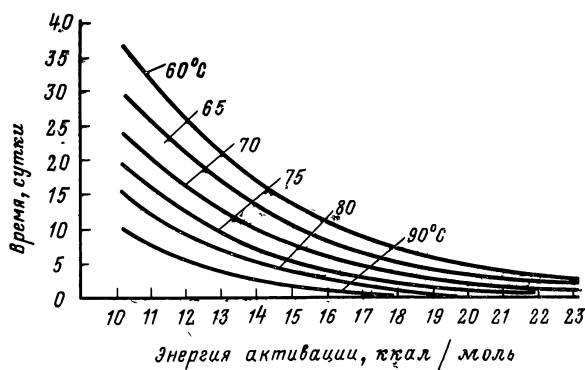
Длительность испытания, моделирующего одногодичное старение при хранении может быть рассчитана по формуле

$$\tau_{\text{и}} = 365 \exp \left[ -\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{и}}} \right) \right], \quad (8-41)$$

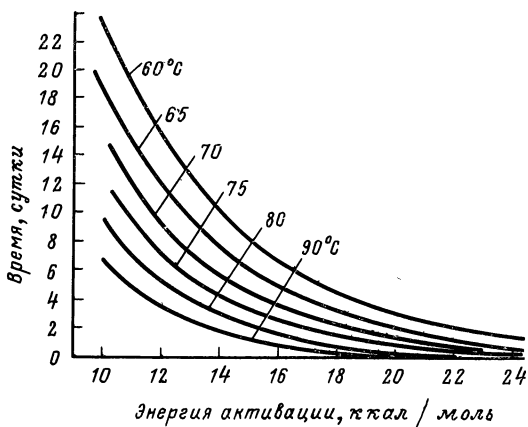
где  $\tau_{\text{и}}$  — время ускоренного испытания при повышенной испытательной температуре, сутки;  $T_{\text{и}}$  — моделирующее

годовое хранение,  $^{\circ}\text{K}$ ;  $T$  — эффективная температура хранения,  $^{\circ}\text{K}$ ;  $E$  — условная энергия активации материала изоляции,  $\text{кал/моль}$  (см. гл. 4);  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Эффективная или эквивалентная температура хранения  $T$  определяется для конкретных условий хранения по гистограмме температура — время с использованием для каждой ступени гистограммы уравнения (8-41).



а)



б)

Рис. 8-5. Номограммы для определения длительности испытания, имитирующего одnogодичное старение в отопляемом складе (а) и в полевых условиях (б).



Для планирования длительности испытаний  $\tau_{и}$  необходимо знание величины  $E$  для конкретной конструкции монтажного провода. Если величина  $E$  неизвестна, то рекомендуется задаваться минимально возможным значением  $E$  для кабельных материалов. Экспериментально установлено, что минимально возможное значение условной энергии активации для изоляционных материалов составляет 13,0 ккал/моль.

Продолжительность ускоренных испытаний на сохранность в складских и полевых условиях хранения можно определять также по номограммам Зоткина и Руденко, построенным по уравнению (8-41) и показанным на рис. 8-5.

Из номограммы на рис. 8-5,а видно, что старение монтажных проводов при хранении их в складских условиях на территории СССР в течение 1 года ( $E = 13,0$  ккал/моль) эквивалентно старению при температуре  $+70^{\circ}\text{C}$  в течение 13 суток, или 312 ч. Испытания, имитирующие полевое хранение проводов в течение 1 года, проводятся с учетом всех описанных выше воздействий. Продолжительность теплового старения определяется из номограммы на рис. 77. Для  $E = 13,0$  ккал/моль и  $T_{и} = +70^{\circ}\text{C}$  находим  $\tau_{и} = 7$  суток = 168 ч. Воздействие пониженной температуры осуществляется путем выдерж-

Таблица 8-3

Вид испытаний	Условия и пара-						
	Пониженная температура		Повышенная температура			Сезонные	
	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Продолжительность, ч	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность, %	Продолжительность, ч	Пониженная температура	
						Температура, $^{\circ}\text{C}$	Продолжительность, ч
Испытания, имитирующие 1 год хранения в складских условиях	—	—	$+70 \pm 2$	60—80	312	—	—
Испытания, имитирующие 1 год хранения в полевых условиях	$-50 \pm 2$	8	$+70 \pm 2$	60—8	168	$0-50 \pm 2$	3

ки образцов проводов в камере холода при предельной минусовой температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ . Поскольку в области пониженных температур физико-химические процессы в полимерных материалах сильно замедляются, нет необходимости имитировать полную продолжительность хранения проводов при отрицательных температурах. Основной задачей этих испытаний является проверка влияния значительного охлаждения и возникающего при этом напряженного состояния на целостность изоляции проводов. Поэтому время экспозиции при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$  выбирается равным 8 ч.

Воздействие сезонных изменений температур при ускоренных испытаниях моделируется посредством разового изменения температур от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Суточные изменения в отличие от сезонных повторяются значительно чаще, но при меньших амплитудах колебаний температуры. Особенно важным здесь является многократность перехода температуры и через нулевое значение, поскольку процесс образования и таяния льда в микропорах, трещинах и воздушных включениях сопровождается значительным изменением объема, что может привести к ухудшению характеристик изоляции. Количество суточных циклов на один условный год полевого хранения принято равным 23 исходя из возможного числа переходов с су-

метры испытаний

изменения			Суточные изменения						
Повышенная температура		Количество сезонных циклов	Пониженная температура		Повышенная температура			Количество суточных циклов	Количество годовых циклов
Температура, $^{\circ}\text{C}$	Продолжительность, ч		Температура, $^{\circ}\text{C}$	Продолжительность, ч	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность, %	Продолжительность, ч		
—	—	—	—	—	—	—	—	—	9
$+50 \pm 2$	3	1	$-30 \pm 2$	2	$+30 \pm 2$	95—98	2	23	3

точной температуры через нуль, подсчитанного Бюро расчетов и справок Гидрометеослужбы. Значения пониженной и повышенной температур при этом выбираются исходя из максимально возможных амплитуд колебаний температуры, т. е.  $\pm 30^\circ\text{C}$ , причем температура  $+30^\circ\text{C}$  поддерживается при максимальной относительной влажности 95—98%.

Общий объем ускоренных испытаний монтажных проводов на сохраняемость состоит из 12 годичных циклов, имитирующих 12-летнее хранение в складских (9 лет) и полевых (3 года) условиях, которые трижды проводятся в такой последовательности: три цикла испытаний, имитирующих складское хранение; один цикл испытаний, имитирующий полевое хранение.

Таким образом, для проведения ускоренных испытаний на сохраняемость суммарно требуется 6—8 мес. с учетом перерывов на измерение параметров проводов, ремонт оборудования и праздничные дни. Состав и последовательность этих испытаний приведены в табл. 8-3.

Объем выборки для испытаний монтажных проводов на сохраняемость рассчитывается по тем же формулам и таблицам, что и объем выборки для испытаний проводов на надежность.

Поскольку в основу испытаний проводов на сохраняемость положена система «годен — не годен», соответствующая распределению отказов во времени по закону Пуассона, минимальное количество образцов определяется требованиями по надежности оценки и достоверности (риску заказчика) этих испытаний. Как правило, эти требования ограничиваются надежностью оценки  $P = 0,9 \div 0,95$  и риском заказчика  $\beta = 0,3$  ( $\alpha = 0,7$ ), что при значении приемочного числа  $C = 0$  соответствует объему выборки из 12—23 образцов.

Описанный метод оценки сохраняемости монтажных проводов относится к классу ускоренных испытаний и в принципе требует практической проверки. С помощью этого метода провода испытываются на стадии разработки с целью установления гарантийных сроков хранения. Для подтверждения этих гарантий при внедрении проводов в серийное производство последние закладываются на длительное хранение в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным в разных климатических зонах СССР с ежегодной проверкой параметров — критериев годности.

### 8-4. Долговечность

Как указывалось выше, долговечность — это свойство монтажных проводов сохранять работоспособность в течение определенного периода времени.

Экспериментально установлено, что основным фактором, влияющим на работоспособность монтажных проводов в условиях эксплуатации, является воздействие повышенной температуры (тепловое старение). В связи с этим метод оценки долговечности проводов аналогичен методу оценки их нагревостойкости. Принципиальная разница заключается лишь в том, что при оценке нагревостойкости срок службы провода задается и определяется максимально допустимая температура эксплуатации, а при оценке долговечности по известной нагревостойкости провода определяется срок его службы. Математический аппарат для обработки результатов испытаний на долговечность тот же, что и в гл. 4. В настоящем параграфе рассматриваются конкретные рекомендации по проведению этих испытаний.

Испытания на долговечность проводятся на образцах проводов длиной не менее 1,5 м, прошедших приемосдаточные испытания. Испытания являются циклическими и продолжаются до выхода из строя при каждой испытательной температуре не менее 50% образцов. Состав цикла и последовательность испытательных воздействий приведены в табл. 8-4.

Таблица 8-4

Воздействующие факторы	Длительность испытаний, ч
Выдержка при повышенной температуре	В зависимости от испытательной температуры
Нормальные условия	2
Выдержка при пониженной температуре (условия монтажных изгибов)	2
Нормальные условия	2
Выдержка в условиях относительной влажности воздуха 98% при температуре +40 °С	24

Продолжительность выдержки проводов в каждом испытательном цикле при повышенной температуре устанавливается 1, 2, 4, 7, 14 или 28 суток.

После окончания каждого цикла производят внешний осмотр образцов и испытание в течение 1 мин напряжением, равным двойному рабочему напряжению провода на переменном токе.

Критериями выхода из строя образцов провода являются электрический пробой, а также растрескивание изоляции или защитной оболочки.

Поскольку к моменту испытаний проводов на долговечность, как правило, известны данные об их нагревостойкости, а следовательно, и значения условной энергии активации изоляции  $E$  или коэффициента  $A$  (см. § 4-1), то в некоторых случаях с целью сокращения времени допускается проведение испытаний монтажных проводов на долговечность при одной (максимальной) испытательной температуре. Долговечность провода в этом случае определяется по формуле

$$\tau = \tau_{\text{и}} \exp A \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{и}}} \right) = \tau_{\text{и}} \exp E/1,987 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{и}}} \right), \quad (8-42)$$

где  $\tau$  — срок службы провода при максимальной рабочей температуре  $T$ , ч;  $\tau_{\text{и}}$  — срок службы провода при испытательной температуре  $T_{\text{и}}$ , ч.

Поскольку испытания на долговечность, так же как и на сохраняемость, относятся к классу ускоренных испытаний, необходима проверка результатов этих испытаний, проводимая в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Эта проверка может производиться как в процессе разработки провода путем испытания образцов при максимальной рабочей температуре в течение всего заданного срока службы, так и в эксплуатационных условиях у потребителя (так называемые ресурсные испытания).

## КОНСТРУИРОВАНИЕ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

---

### Глава девятая

#### КОНСТРУИРОВАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ

##### 9-1. Применяемые материалы

Провода, предназначенные для монтажа современной электронной аппаратуры, должны надежно работать в самых широких диапазонах температур и давлений, обеспечивая при этом минимальное тепловое рассеяние энергии, минимальное искажение уровня и формы сигналов, передаваемых по ним. Кроме того, общая тенденция к миниатюризации аппаратуры выдвигает требование высокой механической прочности применяемых материалов, а большая насыщенность объемов электро-радиоэлементами требует обеспечить достаточную скорость и надежность пайки токопроводящих жил.

Из чистых металлов наиболее полно отвечает этому комплексу требований медь. Однако медная проволока без защитного покрытия для токопроводящих жил монтажных проводов сейчас почти не применяется. Это объясняется прежде всего тем, что при монтаже современной малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры провода используются в очень небольших длинах, так что обычно количество паяк, приходящихся на метр проложенного провода достигает нескольких десятков. Таким образом, как с точки зрения надежности паяк, являющихся наиболее уязвимым местом монтажа, так и с точки зрения повышения производительности сборки аппаратуры целесообразно всю проволоку в жиле покрывать металлом или сплавом, обеспечивающим мягкую и надежную припайку жилы. Есть и другая причина, препятствующая применению медной проволоки без защитных покрытий: в процессе эксплуатации происходит окисление меди и процесс этот тем интенсивнее, чем выше температура, при которой эксплуатируется провод.

Для токопроводящих жил проводов, рабочая температура которых менее 180—200 °С, в качестве защитных покровов применяются олово или свинцово-оловянистые сплавы, наносимые на проволоку методом горячего лужения. Медная проволока для токопроводящих жил, предназначенных для эксплуатации при температурах 180—200 °С, обычно покрывается слоем серебра. Технология изготовления посеребренной проволоки гальваническим способом хорошо известна, следует только заметить, что после гальванического наложения серебра его слой обязательно уплотняется волочением. Толщина гальванического слоя серебра, обеспечивающего хорошую стойкость токопроводящей жилы к длительному нагреву до +200 °С и удовлетворительную стойкость к коррозионным средам, равна 6—12 мкм. Серебряное покрытие по отношению к меди в большинстве коррозионных сред является катодной защитой. В этих условиях медь по отношению к серебру оказывается растворимым электродом (анодом) и для надежной ее защиты должны обеспечиваться хорошая сплошность и беспористость слоя серебра. Попытки, сделанные за рубежом, снизить толщину слоя гальванического серебра на медной проволоке до 1 мкм в токопроводящих жилах и экранах проводов с фторопластовой изоляцией привели к появлению массовых дефектов вследствие коррозии меди через поры в серебряном покрытии.

В последнее время разработан новый способ получения медной посеребренной проволоки. Этот метод заключается в совместном горячем прессовании биметаллической (медь — серебро) шашки, при котором создается промежуточный диффузионный слой, обеспечивающий надежное сцепление слоев металлов при последующем волочении полученной заготовки до нужных размеров. Полученное таким способом покрытие имеет значительно более высокую плотность по сравнению с гальваническим и позволяет несколько снизить толщину серебряного слоя.

Для токопроводящих жил проводов, рассчитанных на работу при температурах от 200 до 300 °С, применяется медная проволока, покрытая слоем никеля, составляющим 3—6% от массы проволоки. Такое покрытие, получаемое гальваническим способом, сравнительно недорого, однако его широкому распространению препятствует сложность пайки. Для пайки никелированной токопро-

водящей жилы требуются специальные флюсы и повышенные температуры, что в свою очередь приводит к необходимости повышения теплостойкости изоляционных материалов, применяемых для штыревых разъемов.

Для токопроводящих жил, рассчитанных на работу при температурах свыше  $300^{\circ}\text{C}$ , применяется медная проволока, покрытая слоем никеля примерно 28—30% от массы меди. Такая проволока изготавливается металлургическим способом — волочением биметаллической заготовки.

Наконец, для токопроводящих жил проводов с рабочей температурой  $450^{\circ}\text{C}$  и выше применяется медная проволока, плакированная нержавеющей сталью. Часто для проводов, эксплуатируемых при высоких температурах, выдвигается требование по стойкости к воздействию глубокого вакуума. В этих случаях важным становится явление сублимации металла, к которому особенно стойки покрытия из нержавеющей сталей. На рис. 9-1 представлены типы нагревостойких проволок, выпускаемых фирмой Sylvania Electric Products, Inc (США).

Во многих случаях конструктор аппаратуры, рассчитав требуемое сечение провода по электрическим параметрам (обычно по падению напряжения), вынужден применять провод, сечение которого существенно выше расчетного, из-за недостаточно механической прочности жилы. В результате неоправданно завышаются масса и габариты аппаратуры. Это привело к поиску материалов, обеспечивающих повышение механической прочности токопроводящих жил. Одним из решений вопроса явилось применение упрочняющих центральных проволок в жилах семипроволочной конструкции. В качестве такого упрочняющего элемента обычно применяется биметаллическая проволока со стальным сердечником, покрытым

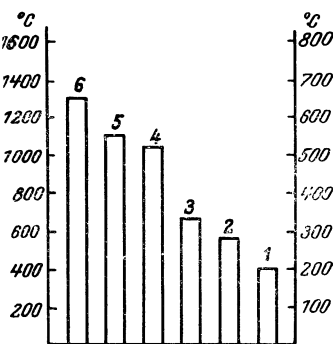


Рис 9-1. Типы высокотемпературных биметаллических проволок.

1 — медная посеребренная проволока, 2 — медная 5%-ная никелированная проволока, 3 — то же 10%-ная; 4 — то же 28%-ная; 5 — медная проволока, покрытая сплавом Inconel, 6 — то же, покрытая сплавом Oxaloy



слоем меди. Изготовленная металлургическим методом биметаллическая проволока имеет прочность 100—150  $\text{кгс/мм}^2$ , содержит около 40% меди и выпускается диаметрами 0,15 мм и выше. Хорошо известны монтажные провода с токопроводящей жилой, упрочненной биметаллической проволокой (МПУ, СФУ и др.), нашедшие широкое применение в разных типах аппаратуры.

В последнее время разработана и выпускается биметаллическая (сталь — медь) проволока с медным слоем, полученным гальваническим путем. Сердечник этой проволоки изготовлен из высокосортной стали, прочность ее достигает 250—280  $\text{кгс/мм}^2$ . В зависимости от назначения биметаллическая проволока лудится или серебрится. Еще более перспективным является создание специальных высокопрочных низкоомных сплавов, предназначенных для токопроводящих жил монтажных проводов. Так, фирма Hudson Wire Co., Ossining (США) применяет для этой цели сплавы меди с хромом, меди с кадмием, тройной сплав меди с хромом и кадмием, сплав меди с цирконием. Известен также сплав меди с 0,5% циркония и 0,28% мышьяка, имеющий предел прочности 51  $\text{кгс/мм}^2$  и 90% проводимости чистой меди, или сплав меди с 2% никеля, 0,6% титана и 0,2% алюминия, имеющий предел прочности 60  $\text{кгс/мм}^2$  и проводимость около 60% от проводимости меди. Применяемый в отечественной практике сплав ХОТ представляет собой сплав меди с хромом, титаном и оловом. На основе проволоки из этого сплава созданы упрочненные токопроводящие жилы для ряда проводов, выпускаемых кабельной промышленностью.

## **9-2. Размерный ряд сечений токопроводящих жил**

Диапазон сечений токопроводящих жил, входящих в ряд, должен полностью соответствовать назначению монтажных проводов. При непрерывно растущей тенденции к миниатюризации элементов радиоэлектронной аппаратуры и огромном многообразии трактов, выполняемых с помощью монтажных проводов, определить минимальное сечение токопроводящих жил весьма затруднительно.

В отечественной и зарубежной практике ряд сечений монтажных проводов начинается с сечения примерно

0,03 мм<sup>2</sup>. Однако анализ требований потребителей показывает, что электрические параметры довольно значительного числа схем позволяют применять провода и меньшего сечения. Таким образом, ограничение минимального сечения накладывается скорее не областью применения монтажных проводов, а возможностями изготовления токопроводящих жил. Максимальное сечение монтажного провода исходя из опыта эксплуатации ограничивается сечением 2,5 мм<sup>2</sup>.

Ряд сечений токопроводящих жил должен быть равномерным. Это значит, что отношение каждого последующего члена ряда к предыдущему должно быть примерно одинаковым. Соблюдение такого требования способствует сокращению числа номинальных сечений токопроводящих жил. Ряд должен обладать достаточной частотой, что обеспечит возможность оптимального выбора проводов по сечению и будет иметь существенное значение для снижения габаритов и массы аппаратуры.

Вместе с тем чрезмерно высокая частота ряда сечений создает организационные и технологические трудности для кабельных заводов, приводит к нерациональному использованию имеющихся мощностей. Поэтому выбор частоты ряда сечений производится с учетом тех и других противоречивых требований.

Наилучшим решением этого вопроса явилось бы соответствие ряда сечений токопроводящих жил ряду предпочтительных чисел, утвержденному международной организацией по стандартизации (ИСО) и нормированному ГОСТ 8032-56. Широкое внедрение рядов предпочтительных чисел в различные отрасли промышленности создает хорошие возможности для унификации любых изделий.

Интересно отметить, что ряд сечений токопроводящих жил американских кабельных изделий, являющийся частью Американского проволочного стандарта AWG (American Wire Gauge), составлен в соответствии с рядом предпочтительных чисел. Этим стандартом нормируются диаметры и сечения медных проволок, применяемых для токопроводящих жил кабельных изделий, а также электрическое сопротивление и масса проволок на единицу длины.

Стандарт AWG включает в себя 54 размера проволоки (от 50 до 4/0), причем чем выше размер по AWG, тем меньше диаметр и соответственно сечение проволоки.

Так, например, размер AWG-50 соответствует проволоке 0,025 мм и сечением 0,0005 мм<sup>2</sup>, а размер AWG-4/0 соответствует проволоке 11,68 мм сечением 107,2 мм<sup>2</sup>.

Ряд диаметров проволок по AWG представляет собой приближенный десятичный ряд геометрической прогрессии со знаменателем

$$q_d = \sqrt[20]{10} = 1,12.$$

Следовательно, ряд сечений токопроводящих жил по этому стандарту представляет такой же ряд, но со знаменателем

$$q_s = \sqrt[10]{10} = 1,25,$$

что соответствует ряду предпочтительных чисел R 10 по ГОСТ 8032-56.

Диапазон сечений монтажных проводов в США включает размеры AWG от 32 до 10, что соответствует диапазону сечений 0,0315—5,3 мм<sup>2</sup>.

Таблица 9-1

R10(0,0256 . . . 2,56)	R5(0,0256 . . . 2,56)	R10/2(0,0315 . . . 2,00)
0,02560	0,0256	—
0,0315	—	0,0315
0,040	0,040	—
0,050	—	0,050
0,067	0,067	—
0,10	0,10	—
0,125	—	0,125
0,16	0,16	—
0,20	—	0,20
0,256	0,256	—

Продолжение табл 9-1

R10(0,0256 . . . 2,56)	R5(0,0256 . . . 2,56)	R10/2(0,060315 . . . 2,00)
0,315	—	0,315
0,40	0,40	—
0,50	—	0,50
0,67	0,67	—
0,80	—	0,80
1,25	—	1,25
1,60	1,60	—
2,00	—	2,00
2,56	2,56	—

Рассмотрим ряд предпочтительных чисел R 10 (0,0256....2,56) и производные от него ряды R 5 (0,0256....2,56) и R 10/2 (0,0315...2,0) с точки зрения возможности использования их в качестве основы для построения ряда сечений токопроводящих жил монтажных проводов с учетом сформулированных выше требований (табл. 9-1).

Очевидно, что ряд R 10 (0,0256...2,56) обладает чрезмерной частотой и поэтому применение его нецелесообразно. Кстати, в американской практике хотя и использован подобный ряд, однако для монтажных, авиационных и других аналогичных проводов применяются только четные члены этого ряда. Частота двух других рядов, приведенных в табл. 9-1, по-видимому, является оптимальной. Анализируя численные значения этих рядов, нетрудно убедиться, что в интервале сечений от 0,03 до 0,75 принятые в настоящее время оптимальные сечения токопроводящих жил монтажных проводов наилучшим образом совпадают с рядом 10/2, а в области больших сечений — с рядом R 5 (табл. 9-2).

Т а б л и ц а 9-2

Ряд предпочтительных чисел R10/2 . . .	0,0315	0,05	0,08	—	0,125	—	0,20
Ряд предпочтительных чисел R5 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—
Предлагаемый ряд сечений . . . . .	0,03	0,05	0,08	—	0,12	—	0,20

*Продолжение табл. 9-2*

Ряд предпочтительных чисел R10/2 . . .	0,315	—	0,50	0,80	—	—	—
Ряд предпочтительных чисел R5 . . . . .	—	—	—	—	1,0	1,6	2,56
Предлагаемый ряд сечений . . . . .	—	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5

Таким образом, следует рекомендовать следующий размерный ряд сечений токопроводящих жил монтажных проводов: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 и 2,5 мм<sup>2</sup>.

### 9-3. Выбор оптимальных конструкций

#### а) Общие соображения

Выбранная конструкция жилы должна обеспечивать минимальные габариты и массу провода, а также оптимальные значения таких важнейших монтажных и эксплуатационных характеристик, как гибкость, стойкость к перегибам, усталостная прочность в запайке и т. д.

Понятие конструкции жилы включает в себя следующие элементы: 1) число проволок, входящих в жилу; 2) систему скрутки; 3) коэффициент скрутки.

Выбор оптимального количества проволок, входящих в жилу, имеет принципиальное значение. Это объясняется тем, что при заданном сечении возможно два принципа конструирования жил. В первом случае выбирается определенное количество проволок, обеспечивающих правильную систему скрутки, а следовательно, и минимальные габариты жил (диаметры отдельных проволок при этом получаются расчетным путем); во втором случае задаются диаметры отдельных проволок, а их необходимое количество рассчитывается. Преимущества второго способа конструирования заключаются в возможности сократить до минимума номенклатуру медной проволоки, применяемой для токопроводящих жил кабельных изделий, и тем самым упростить организацию производства и уменьшить стоимость этой проволоки.

Однако жесткие требования к надежности монтажных проводов при сохранении минимальных габаритов и масс, а также необходимость применения в качестве изоляции новых полимерных материалов со сложной технологией переработки, как будет показано ниже, не позволяют широко применять этот способ.

Токопроводящие жилы кабельных изделия могут быть скручены правильной или шнуровой скруткой.

При правильной скрутке поверх одной или нескольких центральных проволок, скрученных вместе, накладывается еще один или несколько повивов, причем каждый последующий повив скручивается в направлении, противоположном предыдущему. При шнуровой скрутке все проволоки скручиваются вместе в одну сторону. При правильной скрутке количество проволок в центре количества в жиле составляют ряд: 7; 19; 37 и т. д. Шнуровой скруткой можно крутить практически любое количество проволок. По литературным данным жилы, скрученные

шнуровой скруткой, являются более гибкими, но менее однородными по наружному диаметру. Последнее обстоятельство сильно затрудняет наложение на такую жилу тонкостенной пластмассовой изоляции, а в отдельных случаях и вовсе исключает такую возможность.

В связи с этим весьма интересным представляется рассмотрение конструкций токопроводящих жил, применяемых в американских монтажных проводах (табл. 9-3). Из табл. 9-3 следует, что токопроводящие жилы, скрученные шнуровой скруткой, допускаются только для проводов, изолируемых спиральной обмоткой лентами, технология которых не осложняется неправильной геометрией, а также для проводов с изоляцией из легкоперерабатывающихся с помощью экструзии материалов (поливинилхлорид и силиконовая резина). Для проводов с изоляцией из новых полимеров (тефлон TFE, тефлон FEP) со сложной технологией переработки применяются жилы, скрученные только правильной скруткой.

Кроме того, не меньшее значение имеет правильный выбор коэффициентов (или шагов) скрутки. В технической литературе существует мнение, что чем меньше ко-

Таблица 9-3

**Конструкции токопроводящих жил американских монтажных проводов в зависимости от материала изоляции и способа его наложения на провод**

Сечение токопроводящих жил		Материал изоляции и метод ее наложения				
		Экструзия				Спиральная обмотка лентами [политетрафторэтилен (тефлон)]
		Поливинилхлорид	Силиконовая резина	Фторированный этилен-пропилен (тефлон FEP)	Политетрафторэтилен (тефлон TFE)	
по AWG	мм <sup>2</sup>					
32	0,032	7×40*	—	—	7×40	—
30	0,051	7×38	—	7×38	7×38	7×38
28	0,081	7×36	—	7×36	7×36	7×36
26	0,13	7×34; 10×36; 26×40	—	7×34	7×34	10×36; 7×34
24	0,20	7×32; 16×36; 41×40	7×32	7×32	7×32; 19×36	16×34; 19×36
22	0,32	7×30; 61×40	7×30	7×30	7×30; 19×34	7×30; 19×34; 27×36
20	0,52	10×30 7×28	10×30	7×28	7×28; 19×32	19×32 41×36
18	0,82	7×26; 16×30; 19×32	16×30	19×30	7×26; 19×30	7×26 19×30
16	1,31	19×26; 26×30	26×30	19×29	19×29	19×29
14	2,1	19×27; 41×30	41×30	—	19×27	19×27
12	3,31	65×30	65×30	—	—	—
10	5,26	105×30	65×28	—	—	—

\* Диаметры отдельных проволок даны по размерам  $\frac{1}{2}$ AWG.

эффицент скрутки, тем жила более гибкая и обладает большей стойкостью к многократным перегибам. С другой стороны, уменьшение этого коэффициента приводит к увеличению массы жилы и снижению производительности машин.

Критериями выбора конструкций токопроводящих жил в исследованиях, проведенных авторами, приняты оптимальные величины гибкости жил, стойкости их к многократным перегибам, а также усталостной прочности в запайке. Испытания проводились по методикам, описанным в гл. 3. При этом испытывались как жилы без изоляции, так и изолированные провода.

## б) Исследование гибкости

Результаты измерения гибкости неизолированных токопроводящих жил разных конструкций приведены в табл. 9-4—9-6. В таблице 9-4 показаны значения гибко-

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Гибкость, 1/кгс·см <sup>2</sup> , при числе проволок в жиле						
	1	7	12	19	24	49	133
0,05	222	3 060	—	—	—	—	—
0,08	96,0	1 280	—	—	—	—	—
0,12	44,5	896	—	—	—	—	—
0,20	14,4	217	336	898	1 250	—	—
0,35	4,7	54	142	224	403	1 680	—
0,50	3,3	30	43	94	145	935	—
0,75	1,3	19	23	26,6	49	389	856
1,0	0,5	4,0	—	24	31,5	244	530
1,5	0,35	0,8	—	5,4	23	186	421

Таблица 9-5

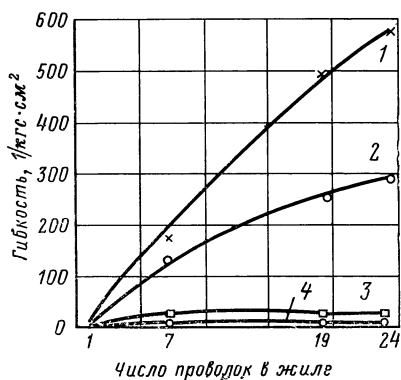
Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Конструкция	Гибкость 1/кгс·см <sup>2</sup>	
		Правильная система скрутки	Шнуровая система скрутки
0,20	7×0,20	217	218
0,35	7×0,26	54,2	56,0
0,50	7×0,30	29,8	28,9
0,50	19×0,18	94,0	92,0
0,75	19×0,23	26,6	25,8
1,0	19×0,26	23,9	24,1
1,5	19×0,32	5,4	5,5

сти жил разных сечений в зависимости от количества входящих в них проволок.

Данные, приведенные в этой таблице, показывают, что гибкость неизолированных жил монтажных проводов резко возрастает с увеличением количества проволок в жиле. При этом наибольшее увеличение гибкости происходит при переходе от однопроволочной к семипроволочной конструкции жилы. Что касается системы скру-

Рис. 9-2. Зависимость гибкости проводов с различными видами изоляции от конструкции токопроводящей жилы ( $s=0,2 \text{ мм}^2$ ).

1 — провод с изоляцией из кремнийорганической резины ( $\delta=0,4 \text{ мм}$ ); 2 — провод с изоляцией из поливинилхлорида ( $\delta=0,3 \text{ мм}$ ); 3 — провод с изоляцией из фторопласта 4Д ( $\delta=0,2 \text{ мм}$ ); 4 — провод с изоляцией из полиэтилена высокой плотности ( $\delta=0,3 \text{ мм}$ ).



ки, то практически можно считать, что при одинаковых конструкции и сечении жилы ее гибкость не зависит от принятой системы скрутки (табл. 9-5).

Сравнение гибкости токопроводящих жил, скрученных с различными коэффициентами скрутки (табл. 9-6),

Таблица 9-6

Сечение жил, $\text{мм}^2$	Конструкция	Наружный диаметр, мм	Шаг скрутки, мм	Коэффициент скрутки	Гибкость, $1/\text{кгс}\cdot\text{см}^2$
0,35	12×0,20	0,83	8,3	10	143
			12,6	15	142
			15,2	18	140
0,75	19×0,23	1,15	11,6	10	28,3
			16,0	14	28,0
			18,5	16	26,6
			22,8	20	25,0
1,0	7×0,43	1,29	15,0	11,5	4,15
			19,0	15	4,1
			22,5	17	4,0
			25,6	20	3,8



также показало, что в диапазоне сечений монтажных проводов значение коэффициента скрутки существенно не влияет на величину гибкости жил. Результаты измерения гибкости изолированных жил монтажных проводов приведены в табл. 9-7 и на рис. 9-2.

Таблица 9-7

Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Конструкция	Гибкость, 1/кгс см <sup>2</sup> , при материале изоляции			
		Поливинилхлорид (δ=0,3 мм)	Полиэтилен высокой плотности (δ=0,3 мм)	Фторопласт 4Д (δ=0,2 мм)	Кремнийорганическая резина (δ=0,4 мм)
0,20	1×0,52	13,9	7,35	9,9	14,3
	7×0,20	137	14,0	27,2	180
	19×0,12	262	14,8	30,0	490
	24×0,10	290	14,9	30,4	580
0,35	1×0,68	4,55	3,0	3,7	4,65
	7×0,26	45	7,25	13,2	50
	19×0,15	92	8,0	16,1	167
	49×0,10	225	8,2	17,1	475
0,5	1×0,79	3,14	2,2	2,6	3,28
	7×0,30	26,6	5,3	9,0	28,4
	19×0,18	67	6,3	11,4	80
	49×0,12	185	6,6	12,9	332
0,75	1×0,97	1,29	0,9	1,1	1,295
	7×0,37	17,1	3,1	5,7	18,0
	19×0,23	21,4	3,25	6,1	24,8
	49×0,12	123,0	3,6	7,8	18,5
1,0	1×1,13	0,59	0,5	0,53	0,595
	19×0,26	19,3	2,55	4,3	21,7
	49×0,16	71	2,8	5,1	120
	133×0,10	84	2,82	5,15	167
1,5	1×1,37	0,34	0,29	0,31	0,345
	19×0,32	4,95	1,3	1,92	5,2
	49×0,20	45	1,66	1,94	83
	133×0,12	52,2	1,69	2,98	111

Все эти данные дают основания сделать следующие выводы:

а) для монтажных проводов с токопроводящими жилами однопроволочной конструкции суммарная гибкость провода в основном определяется величиной гибкости жилы независимо от материала и толщины изоляции;

б) для монтажных проводов с изоляцией из поливинилхлоридного пластика и особенно кремнийорганической резины применение многопроволочных жил ведет к существенному увеличению гибкости провода;

в) для монтажных проводов с изоляцией из полиэтилена и фторопласта 4Д суммарная гибкость провода в основном определяется гибкостью изоляционного слоя (т. е. увеличение количества проволок, входящих в жилу, не приводит к существенному увеличению гибкости провода).

## в) Исследование стойкости к многократным перегибам

Результаты испытаний неизолированных токопроводящих жил монтажных проводов на стойкость к многократным перегибам приведены в табл. 9-8—9-10. В табл. 9-8 показана зависимость этого параметра от числа проволок, входящих в жилу.

Таблица 9-8

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Количество двойных перегибов до разрушения жилы при количестве проволок						
	1	7	16	19	24	49	133
0,05	318	853	—	—	—	—	—
0,08	226	640	—	—	—	—	—
0,12	183	560	—	—	—	—	—
0,20	102	310	515	561	732	—	—
0,35	67	188	218	253	298	2 080	—
0,50	51	169	193	207	216	1 760	—
0,75	47	153	180	188	203	926	3 120
1,0	44	142	162	173	184	689	2 860
1,5	31	129	152	167	177	623	2 400

Таким образом, стойкость неизолированных жил к многократным перегибам находится в прямой зависимости от конструкции жилы. При одном и том же сечении увеличение числа проволок, входящих в жилу, повышает стойкость ее к многократным перегибам.

Что касается стойкости к перегибам однопроволочных жил, скрученных правильной и шнуровой скруткой, то выяснилось, что система скрутки практически не влияет на величину этого параметра (табл. 9-9).

Таблица 9-9

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Конструкция	Число двойных перегибов до полного разрушения жилы при	
		правильной скрутке	шнуровой скрутке
0,20	7×0,20	310	312
0,35	7×0,26	188	190
0,50	19×0,18	207	199
0,75	19×0,23	188	186
1,0	19×0,26	173	177
1,5	19×0,32	167	171

Выяснилось также, что в интервале сечений токопроводящих жил монтажных проводов величина коэффициента скрутки существенно не влияет на их стойкость к многократным перегибам (табл. 9-10).

Таблица 9-10

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Конструкция	Наружный диаметр, мм	Шаг ск утки, мм	Коэффициент скрутки	Число перегибов до разрушения жилы
0,35	12×0,20	0,83	8,8	10	163
			12,6	15	169
			15,2	18	160
0,75	19×0,23	1,15	11,6	10	188
			16,0	14	182
			18,5	16	183
			22,8	20	179
1,5	19×0,32	1,6	16,0	10	167
			18,5	11,5	165
			32,2	20	160

При испытаниях на стойкость к многократным перегибам изолированных проводов обнаружены те же закономерности, что и при измерении их гибкости. Для проводов с эластичными покрытиями из кремнийорганической резины и поливинилхлорида суммарная стойкость к перегибам существенно зависит от числа проволок, входящих в жилу; для проводов с жесткой изоляцией из полиэтилена и фторопласта увеличение числа проволок жилы не дает желаемого эффекта.

Сказанное выше иллюстрируется данными, приведенными в табл. 9-11. Испытывались провода сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  с конструкцией жилы  $49 \times 0,12$  и разными видами изоляции. Кратность изгибов была равна 10 диаметрам провода.

Таблица 9-11

Тип изоляции	Без изоляции	Кремний-органическая резина	Поливинилхлоридный пластикат	Полиэтилен высокой плотности	Фторопласт 4Д
Число перегибов до разрушения жилы	2 700	2 800	2 270	760	520

#### г) Исследование усталостной прочности в месте пайки

Результаты исследований усталостной прочности в месте пайки токопроводящих жил разных сечений и конструкций приведены в табл. 9-12, 9-13 и на рис. 9-3 и 9-4.

Таблица 9-12

Сечение жилы, $\text{мм}^2$	Конструкция	Время до обрыва жилы в месте пайки (среднее из 10 измерений), мин
0,20	$1 \times 0,52$ $7 \times 0,20$	0,48 830
0,5	$1 \times 0,79$ $7 \times 0,30$	0,32 230
1,5	$1 \times 1,37$ $7 \times 0,52$	0,16 54

В табл. 9-13 и на рис. 9-5 и 9-6 приведены данные по усталостной прочности многопроволочных токопроводящих жил разных конструкций, скрученных как правильной, так и шнуровой скруткой. Результаты испытания обработаны в соответствии с формулой (3-44) при надежности оценки  $P=0,99$ .

Анализ приведенных выше данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Для монтажных проводов, используемых в аппаратуре, подверженной вибрациям, применение однопроволочных жил не рекомендуется.

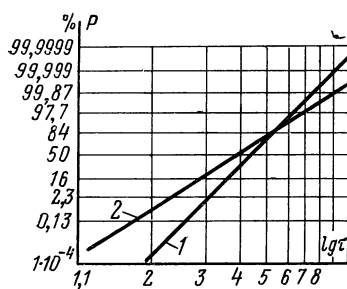


Рис. 9-3. Усталостная прочность в месте запайки токопроводящих жил сечением 0,20 мм².

1 — конструкция 12×0,15; 2 — конструкция 7×0,20.

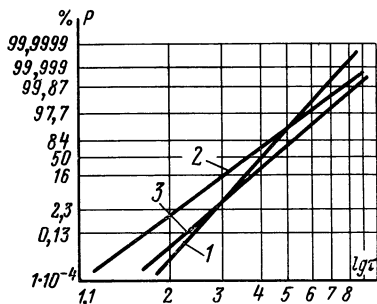


Рис. 9-4. Усталостная прочность в месте запайки токопроводящих жил сечением 0,50 мм².

1 — конструкция 7×0,30; 2 — конструкция 16×0,20; 3 — конструкция 19×0,18.

2. При прочих равных условиях усталостная прочность в месте пайки токопроводящих жил, скрученных шнуро-

Таблица 9-13

Сечение жилы, мм²	Конструкция	Статистические параметры			
		$\bar{\tau}', \text{ мин}$	$\sigma', \text{ мин}$	$C'$	$\tau', \text{ мин}$
0,20	7×0,20	4,7	0,82	0,175	2,52
	7×0,20*	2,09	0,58	0,276	0,57
	12×0,15*	4,02	0,98	0,243	1,46
0,35	7×0,26	5,09	0,69	0,136	3,18
	7×0,26*	2,41	0,63	0,261	0,76
	20×0,15*	5,25	0,84	0,160	3,05
0,5	7×0,30	4,16	0,63	0,151	2,51
	16×0,20*	3,74	0,81	0,217	1,59
	19×0,18	4,64	0,91	0,196	2,26
0,75	7×0,37	1,97	0,808	0,410	0
	19×0,23	4,78	0,743	0,156	2,83
	19×0,23*	3,26	0,78	0,216	1,22
	24×0,20	3,58	0,725	0,204	1,68

\* Жилы, скрученные шнуровой скруткой.

вой скруткой, существенно уступает жилам, скрученным правильной скруткой.

3. Увеличение числа проволок, входящих в жилу, как правило, не приводит к увеличению усталостной прочности в месте пайки. По-видимому, причиной этого является то обстоятельство, что на усталостную прочность в месте пайки, помимо количества проволок, существенно влияет глубина проникновения припоя вдоль жилы при пайке. При одном и том же сечении увеличение

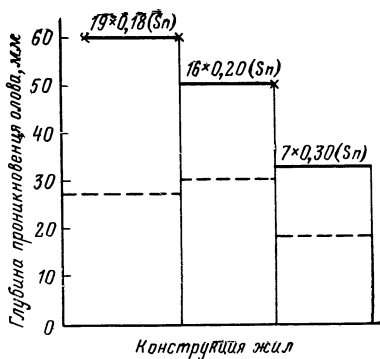


Рис. 9-5. Глубина проникновения олова при пайке токопроводящих жил сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  различных конструкций. Следы олова — сплошная линия; монолитный слой олова — пунктирная линия.

числа проволок в жиле приводит к улучшению капиллярности и позволяет припоем проходить дальше по жиле, образуя большее твердое плечо. Аналогичные явления, по-видимому, происходят и при пайке жил, скрученных шнуровой скруткой, из-за большей рыхлости таких жил. Некоторые результаты исследований по определению способности припоя (ПОС-40) проникать внутрь токоведущих жил разных конструкций приведены на рис. 9-5.

#### д) Рекомендации по выбору оптимальных конструкций токопроводящих жил

На основании приведенных выше общих соображений, а также результатов исследований гибкости, стойкости к перегибам и усталостной прочности в месте пайки авторами разработаны рекомендации по оптимальным конструкциям токопроводящих жил монтажных проводов, которые приведены в табл. 9-14.

При выборе конструкций токопроводящих жил монтажных проводов в соответствии с данными табл. 9-14, необходимо иметь в виду следующее:

1. Однопроволочные конструкции токопроводящих жил можно рекомендовать только для проводов, прокладываемых фиксированно и монтируемых с помощью не-

Таблица 9-14

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Конструкции жил в зависимости от типа (степени гибкости)			
	I	II	III	IV
0,03	—	1×0,20	7×0,08	—
0,05	—	1×0,26	7×0,10	—
0,08	—	1×0,32	7×0,12	—
0,12	1×0,40	7×0,15	19×0,10	—
0,20	1×0,52	7×0,20	19×0,12	49×0,08
0,35	1×0,68	7×0,26	19×0,15	49×0,10
0,5	1×0,79	7×0,30	19×0,18	49×0,12
0,75	1×0,97	7×0,37	19×0,23	49×0,15
1,0	7×0,43	19×0,26	49×0,15	133×0,10
1,5	7×0,68	19×0,32	49×0,20	133×0,12
2,5	19×0,42	49×0,26	77×0,20	133×0,15

паяных соединений в аппаратуре, не подверженной вибрациям.

2. Многопроволочные жилы монтажных проводов должны быть скручены по правильной системе скрутки.

3. Для проводов с жесткими материалами изоляции (полиэтилен, фторопласт) следует рекомендовать семипроволочную (сечения 0,03—0,35 мм<sup>2</sup> и девятнадцатипроволочную конструкцию токопроводящих жил.

4. Токопроводящие жилы типа III и особенно IV следует рекомендовать только для проводов с изоляцией из поливинилхлорида и кремнийорганической резины.

5. Токопроводящие жилы сечением от 0,03 до 0,35 мм<sup>2</sup> рекомендуется выполнять упрочненными.

## Глава десятая

### КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

#### 10-1. Применяемые материалы

Изоляционный слой является основным конструктивным элементом монтажного провода, определяющим большинство его эксплуатационных характеристик. К материалам и конструктивному выполнению изоляции предъявляется ряд требований, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Материал и конструкция изоляции должны обеспечивать работоспособность провода после длительных

или кратковременных воздействий различных механических, климатических и других факторов, а также после длительного хранения в различных условиях. В зависимости от области применения проводов материалы изоляции должны быть стойкими к воздействию высоких и низких температур, влажной среды, продавливающих, ударных и вибрационных нагрузок, химически агрессивных сред и т. д., а также к различным комбинациям указанных воздействий.

2. Материал и конструкция изоляции должны обеспечивать минимальные габариты и массу провода. Это требование диктуется тем, что снижение массы и габаритов проводов, являющееся существенным фактором прогресса в конструировании радиоэлектронной аппаратуры, при заданном сечении оказывается возможным только благодаря применению минимальных толщин изоляции. Это обстоятельство в значительной степени способствовало тому, что в последние годы монтажные провода, изолированные пластмассами, вытеснили провода с резиновой изоляцией, технология наложения которой не позволяет получить достаточно тонкую и высококачественную изоляцию.

3. Материал изоляции должен быть технологичен. При этом под технологичностью материала изоляции понимается не только простота и высокая производительность процесса изолирования, но и обеспечение при минимальной толщине изоляции максимальной стабильности электрических и механических характеристик провода. По существу проблема создания современных монтажных проводов в основном сводится к разработке технологического процесса изолирования, позволяющего при заданной толщине изоляции получить максимальную однородность характеристик провода.

#### **а) Классы нагревостойкости изоляционных материалов**

Основным признаком, отличающим материалы, применяемые для изоляции монтажных проводов, является их нагревостойкость, т. е. максимальная температура, при которой эти материалы могут быть длительно использованы в той или иной конструкции. Как правило, в монтажных проводах именно материал изоляции определяет нагревостойкость провода в целом.

До недавнего времени различали две группы монтажных проводов (и изоляционных материалов): провода



с нормальной и повышенной нагревостойкостью. Провода с нагревостойкостью до 85 °С относили обычно к первой группе, а провода с большей нагревостойкостью получили название теплостойких монтажных проводов.

Необходимо отметить, что это деление является весьма условным и его возникновение исторически связано с тем, что до определенного времени все монтажные провода выпускались с нагревостойкостью, не превышающей 85 °С. Затем синтезирование новых полимерных мате-

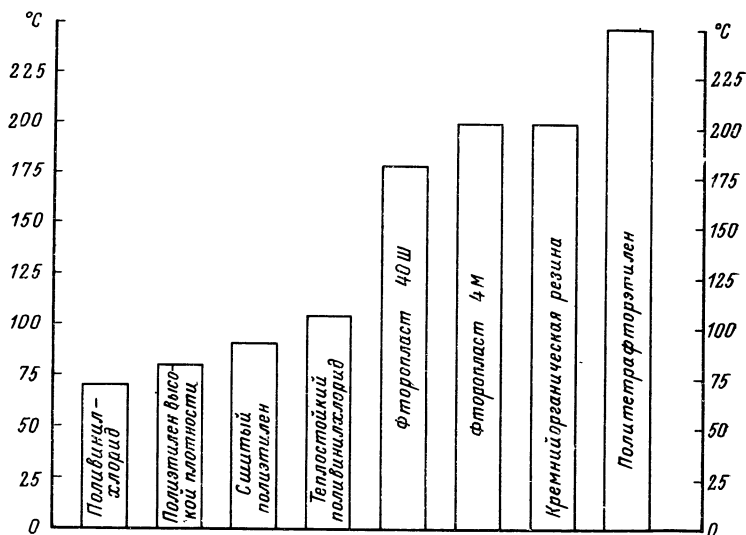


Рис. 10-1. Ряд классов нагревостойкости изоляционных материалов, применяемых для изолирования монтажных проводов.

риалов, таких как кремнийорганические каучуки, политетрафторэтилен и т. д., позволило создать новые провода с нагревостойкостью 200—300 °С. Такие провода, в отличие от предыдущих, называли теплостойкими.

Дальнейшее развитие химии полимеров привело к созданию материалов с промежуточной нагревостойкостью. Провода с изоляцией из этих материалов (специальные рецептуры поливинилхлоридного пластика, полиэтилен высокой плотности, некоторые сополимеры тетрафторэтилена и т. д.) могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур от 100 до 200 °С.

Таким образом, к настоящему времени сложился довольно обширный ряд изоляционных материалов, разделенных по классам нагревостойкости и применяемых для изолирования монтажных проводов (рис. 10-1).

В связи с этим указанная выше классификация потеряла свой первоначальный смысл. Однако необходимо отметить, что по экономическим соображениям провода нормальной нагревостойкости до сих пор являются проводами массового применения и используются во всех видах аппаратуры при температуре окружающей среды, не превышающей 70—80 °С. Что касается проводов с большей нагревостойкостью, то их применяют пока в **значительно** меньших масштабах и, как правило, только в тех случаях, когда по условиям эксплуатации применение проводов нормальной нагревостойкости исключено.

## **б) Основные характеристики изоляционных материалов**

В табл. 10-1 приведены основные характеристики изоляционных материалов, применяемых для изолирования монтажных проводов.

*Поливинилхлоридный пластикат* представляет собой смесь поливинилхлоридной смолы с различными пластификаторами, стабилизаторами и другими добавками. Основными положительными сторонами этого материала являются весьма высокая технологичность, доступность, повышенная гибкость, стойкость к агрессивным средам и негорючесть. К недостаткам поливинилхлоридного пластиката следует отнести сравнительно низкую хладостойкость и худшие, чем у других пластмасс, электрические свойства. Однако, как правило, для изоляции низковольтных монтажных проводов последнее обстоятельство не имеет решающего значения.

Особый интерес представляют рецептуры поливинилхлоридного пластиката, предназначенного длительно эксплуатироваться при температурах от —50 до +105 °С. Такие рецептуры в последние годы широко внедряются в кабельную технику и являются весьма перспективными для использования в качестве изоляции монтажных проводов.

*Полиэтилен* — продукт полимеризации этилена — является одним из самых распространенных полимерных изоляционных материалов, применяемых в кабельной технике. Для изолирования монтажных проводов в настоя-

Таблица 10-1

Параметр	Поливинилхлоридные пластики		Полиэтилен				Фторопласты			Кремний-органическая резина
	нормальной нагревостойкости	повышенной нагревостойкости	низкой плотности	высокой плотности	вулканизующийся	Негорючий	4Д	40ПШ	4М	
Плотность, $г/см^3$	1,26—1,46	1,22—1,36	0,910—0,925	0,94—0,96	0,92—0,93	0,92—0,93	2,18—2,2	1,65—1,70	2,15—2,16	1,20
Временное сопротивление при разрыве, $кгс/см^2$	150—250	125—225	120—160	220—300	120—160	120—160	140—250	300—350	160—250	60—80
Относительное удлинение при разрыве, %	180—310	260—300	400—600	600—900	300—450	400—600	250—500	100—300	250—400	300—500
Длительная нагревостойкость, °C	70	105	85	90—100	90	85	250	180	200	200
Хладостойкость, °C	—40	—40	—60	—60	—60	—60	—60	—60	—60	—60
Влагостойкость	X	X	O	O	X	X	O	X	O	X
Горючесть	H	H	Г	Г	Г	H	H	H	H	Г

Продолжение табл. 10-1

Параметр	Поливинилхлоридные пластики		Полиэтилен				Фторопласты			Кремний- органичес- кая резина
	нормаль- ной нагре- востойко- сти	повышен- ной нагре- востойко- сти	Низкой плотности	Высокой плотности	Вулкани- зующийся	Негорючий	4Д	40П	4М	
Стойкость к аг- рессивным средам	X	X	X	X	X	X	O	X	X	У
Электрическая прочность, кВ/мм	30—40	30—40	40—50	40—50	35—45	30—40	20	30—50	25—30	20—30
Удельное объ- емное сопро- тивление, Ом·см	$1 \cdot 10^{11}$ — $1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{12}$ — $1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{18}$ — $1 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{15}$
Модуль упру- гости при изги- бе, кгс/см <sup>2</sup>	150—200	150—200	1 500	7 000	1 500	1 500	7 000	12 000	6 000	40—60
Технологичность	O	O	O	X	X	X	У	X	X	X
Способ перера- ботки	ЧП	ЧП	ЧП	ЧП	ЧП	ЧП	ПП	ЧП	ЧП	ЧП

29 Условные обозначения: O—отличная; X—хорошая; У—удовлетворительная; Н—негорючий; Г—горючий; ЧП—червячное прессование; ПП—  
19 плунжерное прессование.

щее время используют следующие виды полиэтиленов: полиэтилен низкой плотности, полиэтилен высокой плотности, вулканизирующийся полиэтилен и негорючий полиэтилен.

Полиэтилен низкой плотности, получаемый путем полимеризации этилена при высоком давлении, обладает прекрасными электроизоляционными свойствами и исключительной легкостью, что весьма существенно для монтажных проводов. Этот полиэтилен технологичен, влагостоек, механически прочен и инертен по отношению к большинству агрессивных сред. К числу недостатков полиэтилена низкой плотности относятся сравнительно низкая нагревостойкость, резкое размягчение при кратковременных перегревах, склонность к растрескиванию при соприкосновении с поверхностно-активными средами и горючесть. Кроме того, изоляция из полиэтилена, по сравнению с другими видами изоляции, обладает максимальной усадкой при повышенных температурах. Поэтому полиэтилен низкой плотности используется для изоляции монтажных проводов весьма редко. Значительно чаще для этих целей применяется полиэтилен высокой плотности, получаемый путем полимеризации этилена при низком давлении. Этот материал обладает более высокой нагревостойкостью и механической прочностью (особенно по твердости и стойкости к продавливанию). Однако и этот материал весьма не стоек к кратковременным перегревам, что значительно ограничивает область применения проводов с такой изоляцией.

В связи с этим в последние годы широкое распространение получил так называемый сшитый полиэтилен, представляющий собой композицию из полиэтилена низкой плотности, стабилизаторов, наполнителей и вулканизирующих агентов. В процессе переработки на кабельном оборудовании указанная композиция вулканизуется, т. е. производится поперечная сшивка молекул полиэтилена (химическая сшивка). Сшивку молекулярных цепей полиэтилена можно производить и с помощью ионизационного облучения. В этом случае изолированные полиэтиленом жилы пропускаются через источник (например, ускоритель электронов) и сшивка молекул производится радиационным способом. И в том и другом случае изоляция при сохранении уровня основных электрических характеристик полиэтилена приобретает принципиально новые свойства, важнейшим из которых является стой-

кость к кратковременным перегревам (до 150—200 °С), что позволяет использовать провода с такой изоляцией в специальной аппаратуре.

Для изолирования проводов специального применения используется также негорючий полиэтилен, который может быть получен как химическим путем — за счет прививки в молекулы полиэтилена атомов хлора или фтора, так и путем создания композиций с различными негорючими добавками. В качестве таких добавок обычно применяют трехокись сурьмы и хлорированные углеводороды, выделяющие хлор при высоких температурах. Как видно из табл. 10-1, негорючий полиэтилен по основным электрическим и механическим характеристикам существенно уступает чистому полиэтилену.

*Фторопластами* принято называть пластмассы на основе производных этилена, в которых атомы водорода замещены фтором, а также сополимеры тетрафторэтилена с другими полимерами.

В настоящее время для изолирования монтажных проводов применяются следующие фторопласты: политетрафторэтилен (фторопласт 4Д), сополимер тетрафторэтилена и этилена (фторопласт 40Ш), сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена (фторопласт 4М).

Политетрафторэтилен — продукт полимеризации тетрафторэтилена — обладает прекрасными электрическими и механическими характеристиками и исключительной нагревостойкостью и стойкостью к агрессивным средам. Однако, к сожалению, политетрафторэтилен обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих использование этого материала для проводов массового применения. К таким недостаткам следует отнести повышенную жесткость, высокую плотность и дефицитность. Кроме того, необходимо отметить сравнительно низкую технологичность этого материала, который используется для изолирования монтажных проводов в двух модификациях — в виде порошка, из которого изготавливается паста, выдавливаемая на плунжерных прессах, или в виде сырых каландрованных лент, накладываемых на жилу методом спиральной обмотки. И в том и в другом случае процессы изолирования малопроизводительны и требуют дополнительной весьма токсичной операции — спекания изоляции.

Поэтому большой интерес для массового использования представляют так называемые шприцуемые фторо-

пласты, перерабатываемые на червячных прессах с высокой производительностью. В настоящее время достаточно широко применяются два таких материала — фторопласт 40Ш и фторопласт 4М.

Для изолирования теплостойких монтажных проводов, предназначенных для подвижной эксплуатации, обычно используется резина на основе *кремнийорганических каучуков*. В кабельной технике наибольшее распространение получил полидиметилметилвинилсилоксановый каучук марки СКТВ. Резиновые смеси на его основе весьма технологичны и помимо высокой нагревостойкости обладают отличными электрическими характеристиками, морозостойкостью и стойкостью к воздействию кислорода и озона. Кроме того, при сгорании кремнийорганической резины образуется непроводящий порошок двуокиси кремния, что позволяет использовать провода с такой изоляцией для кратковременной работы в условиях пожара. К недостаткам резин на основе кремнийорганических каучуков следует отнести сравнительно низкие механические характеристики (особенно сопротивление раздиру), а также малую стойкость почти ко всем видам агрессивных сред. Это вынуждает конструировать провода с такой изоляцией со специальными защитными покрытиями в виде гибкой лакированной оплетки из теплостойких нитей.

В последние годы для изоляции монтажных проводов начинают применяться так называемые *дублированные пленки*. Идея создания дублированных пленок заключается в использовании в качестве основы высокопрочных изоляционных пленок и покрытия (дублировании) их тонким слоем термопластичного материала, способного при нагреве спекаться и создавать монолитную изоляцию. В настоящее время наиболее известны полиэфирные (лавсановые) пленки, дублированные полиэтиленом, и полиимидные пленки, дублированные фторированным этиленпропиленом (фторопластом 4М). Применение дублированных пленок с использованием в качестве основы таких высокопрочных материалов, как лавсан и полиимид, позволяет создавать монолитную тонкостенную изоляцию с весьма высокими электрическими и механическими характеристиками.

## 10-2. Понятие об однородности изоляции

По сравнению с конденсаторами, лампами, реле, резисторами и другими элементами радиоэлектронной аппаратуры монтажные провода обладают существенной особенностью, заключающейся в том, что их линейные размеры неизмеримо превышают радиальные. Эта особенность имеет принципиальное значение, так как определяет ряд специфических требований, предъявляемых к кабельным изделиям, используемым в радиоэлектронной аппаратуре. Важнейшим из них является требование максимальной однородности.

Под однородностью монтажных проводов понимается их свойство сохранять постоянными все технические характеристики на отрезках любой длины.

Если отрезок провода определенной длины разбить на отдельные более мелкие отрезки, то можно найти достаточно много параметров, по которым эти отрезки можно сравнивать друг с другом, т. е. оценивать однородность провода. В идеальном случае при абсолютной однородности провода величина любого параметра, измеренная на отрезке любой длины, может характеризовать уровень этого параметра для провода в целом. На практике наличие неоднородностей, рассредоточенных по длине провода, приводит к тому, что величины технических параметров становятся существенно различными для отрезков провода, имеющих разные длины.

Причинами возникновения неоднородности являются неоднородность применяемых материалов и нестабильность технологических процессов изолирования. При этом характер неоднородностей может быть самым различным: это и геометрическая неоднородность (разброс значений наружного диаметра провода и эксцентриситета изоляции), и наличие в изоляции инородных включений, и неоднородность структуры изоляционного материала и т. д.

В связи с этим имеется достаточно много параметров, по которым можно оценивать однородность изоляции проводов. Однако с помощью большинства из них оцениваются только определенные виды неоднородностей. Так, измерение наружного диаметра провода или эксцентриситета дает возможность оценить только степень геометрической неоднородности изоляции; исследование срезов изоляции и подсчет числа инородных включений на



единицу длины провода позволяют оценить только этот вид неоднородности и т. д. Оценки подобного рода могут быть названы локальными. Однако большое число возможных локальных оценок, их сложная взаимосвязь и, наконец, трудоемкость получения многих из них приводят к необходимости выбрать в качестве оценки однородности изоляции более универсальный параметр, позволяющий улавливать максимальное количество видов неоднородностей. Поскольку работоспособность монтажных проводов в основном оценивается величиной электрической прочности изоляции при комплексном воздействии различных механических, климатических и других факторов, то можно предположить, что наиболее эффективным методом оценки однородности проводов с тонкостенной изоляцией является испытание их высоким напряжением. Испытание проводов высоким напряжением принципиально возможно двумя способами. В первом случае напряжение поднимается до пробоя образцов, и критерием однородности изоляции служит степень разброса значений пробивных напряжений, во втором образцы выдерживаются при определенном напряжении и критерием однородности является степень разброса времени до пробоя образцов.

Для сравнения упомянутых выше способов испытаний был проведен следующий эксперимент: из заведомо неоднородного и однородного материалов — в обоих случаях кремнийорганической резины — по однотипной технологии были изготовлены провода двух видов с толщиной изоляции 0,4 и 1,2 мм. По десять метровых образцов проводов были испытаны при плавном повышении напряжения до пробоя, а также выдержаны до пробоя при напряжении, равном 80% от пробивного. Результаты эксперимента приведены в табл. 10-2.

Анализ данных, приведенных в табл. 10-2, показывает, что для проводов с тонкостенной изоляцией разница в степени разброса пробивных напряжений образцов с однородной и неоднородной изоляцией весьма существенна. У проводов же со сравнительно большой толщиной изоляции наличие неоднородностей практически не сказывается на степени разброса значений мгновенной электрической прочности. Надо полагать, что в этом случае размеры и однородных включений существенно меньше толщины изоляции, что и приводит к наблюдаемому эффекту. Весьма интересны результаты испытаний проводов

Таблица 10-2

Толщина изоляции, мм	Номер образца	Величина пробивного напряжения, кВ, для проводов		Время до пробоя образцов, мин, для проводов	
		с неоднородной изоляцией	с однородной изоляцией	с неоднородной изоляцией	с однородной изоляцией
0,4	1	10	12	0	3
	2	11	11	2	5
	3	6	10	0	7
	4	12	12	5	0
	5	13	11	3	5
	6	9	11	0	2
	7	11	12	1	1
	8	9	10	3	7
	9	10	11	0	4
	10	11	12	4	5
1,2	1	28	28	814	850
	2	30	27	0	730
	3	29	30	234	977
	4	27	28	528	618
	5	28	26	1 160	790
	6	30	30	18	844
	7	29	28	540	1 223
	8	26	29	963	1 050
	9	27	27	48	928
	10	28	28	775	1 144

напряжением по второму способу. Здесь наблюдается противоположное явление. Если у проводов с тонкостенной изоляцией степень разброса времени до пробоя при приложении высокого напряжения мало зависит от степени неоднородности изоляционного материала, то у высоковольтного провода эта разница весьма заметна. Можно предположить, что в первом случае нивелирование разброса времени до пробоя образцов с однородной и неоднородной изоляцией происходит за счет весьма малой толщины изоляции, соизмеримой с размерами инородных включений и других неоднородностей. Поэтому в качестве критерия однородности изоляции низковольтных монтажных проводов следует принять степень разброса значений пробивных напряжений проводов, испытанных при плавном подъеме напряжения до пробоя. Этот критерий назван методом динамической оценки однородности. По-видимому, этот же критерий может

быть применен для оценки однородности изоляции обмоточных проводов и проводов питания, изолированных жил кабелей управления и любых других кабельных изделий с тонкостенной изоляцией.

### 10-3. Практическое применение метода динамической оценки однородности

В процессе конструирования и технологического освоения новых типов монтажных проводов метод динамической оценки однородности может найти практическое применение в следующих направлениях: оценка степени освоения технологического процесса изготовления проводов; оценка однородности изоляционных материалов; исследование и выбор оптимальных технологических режимов процесса изолирования.

Кроме того, применение этого метода позволяет обоснованно производить выбор минимально возможных для достигнутого уровня технологии толщин изоляции, а также оценивать величину технологической надежности монтажных проводов.

#### а) Оценка степени освоения технологического процесса

Выше было показано, что распределения значений пробивных напряжений проводов с тонкостенной изоляцией, как правило близки к нормальному закону. Было показано также, что в отдельных случаях в силу чисто технологических причин эти распределения могут быть

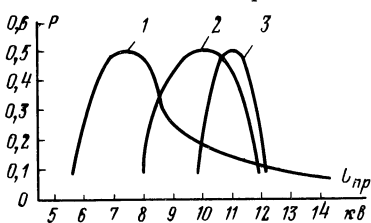


Рис. 10-2. Плотности распределения значений пробивных напряжений проводов с изоляцией из политетрафторэтилена.

1 — начало технологического освоения; 2 — 1 год с начала освоения; 3 — 2 года с начала освоения.

асимметричными и подчиняться нормально-логарифмическому закону.

Рассмотрим графики, изображенные на рис. 10-2 и 10-3. На них показаны плотности распределений значений пробивных напряжений монтажных проводов различных типов, построенные в разные периоды технологического освоения этих проводов. Расчетные ве-

Таблица 10-3

15\*

Тип изоляции	Время с начала освоения	Статистические параметры		
		$\bar{U}_{\text{пр}}, \text{кв.}$	$\sigma, \text{кв.}$	$\text{с}$
Полиэтилен	Начало технологического освоения	8,46	2,2	0,256
	1 год с начала освоения	9,72	1,79	0,185
	2 года с начала освоения	10,8	1,43	0,133
Кремнийорганическая резина	Начало технологического освоения	7,75	1,87	0,245
	1 год с начала освоения	10,1	1,85	0,183
	2 года с начала освоения	11,02	1,68	0,152

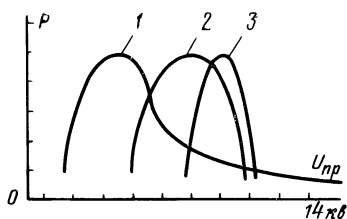


Рис. 10-3. Плотности распределений значений пробивных напряжений проводов с изоляцией из кремнийорганической резины.

1 — начало технологического освоения; 2 — 1 год с начала освоения; 3 — 2 года с начала освоения.

личины статистических параметров указанных распределений приведены в табл. 10-3.

Анализ приведенных выше данных показывает, что, как правило, процесс технологического освоения новых проводов с тонкостенной изоляцией можно условно разделить на три этапа. Вначале в период технологического опробования, когда о примененном изоляционном материале и выбранном технологическом процессе имеются только самые общие сведения, количество неизвестных,

влияющих на однородность факторов, настолько велико, что вполне вероятно превалирование одного или нескольких из этих факторов над остальными. Такая ситуация чаще всего приводит к нормально-логарифмическому распределению. Затем по мере накопления фактических данных и исключения из рассмотрения наиболее явных факторов, снижающих однородность, количество влияющих факторов существенно снижается, а степень их влияния на однородность нивелируется и становится примерно одинаковой. Такая фаза технологического освоения уже характеризуется нормальным распределением значений пробивных напряжений. На этом этапе выбранную конструкцию провода уже можно оценивать величиной среднего пробивного напряжения. Однако однородность изоляции еще недостаточно велика, что подтверждается сравнительно большими значениями коэффициента вариации. И, наконец, на заключительном этапе технологического освоения, когда выявлены все влияющие факторы и выбраны их оптимальные величины, однородность изоляции достигает максимума, т. е. разброс значений пробивных напряжений, распределение которых подчиняется тому же нормальному закону, становится минимальным.

Таким образом, с помощью определения количественных показателей однородности мы можем оценить степень освоения технологии изготовления того или иного провода. Кроме того, с помощью этого метода можно

сравнивать уровень технологии изготовления однотипных проводов, выпускаемых разными заводами. Последнее обстоятельство имеет большое значение при аттестации качества выпускаемой продукции.

## 6) Оценка однородности изоляционных материалов

Стабильность (однородность) изоляционных материалов является одним из необходимых условий высокой однородности проводов с тонкостенной изоляцией. К сожалению, техническая документация на изоляционные материалы, применяемые в кабельной технике, не содержит требований и методов испытаний, обеспечивающих их технологическую стабильность. В результате свойства материалов весьма часто меняются от партии к партии, что вынуждает или подбирать для каждой партии материалов свои оптимальные режимы переработки, или получать провода с низкой однородностью. Поэтому возможность оценки технологической стабильности материалов имеет исключительно важное значение как с точки зрения выбора наилучшего поставщика, так и с точки зрения разработки конкретных требований к этим материалам, позволяющим корректировать техническую документацию в направлении повышения их стабильности. В отдельных случаях для получения информации о предельных возможностях того или иного ново-

Таблица 10-4

Год изготовления материала	Номер партии	Объем выборки	Статистические параметры		
			$\bar{U}_{пр}, кв$	$\sigma, кв$	$C$
1964	1115	50	22,1	4,2	0,190
	1136	50	24,3	5,8	0,238
	1256	120	25,4	6,3	0,251
1965	1309	50	30,6	4,9	0,160
	1338	100	35,1	4,9	0,111
	1345	60	26,1	2,82	0,108
	1375	50	28,4	3,55	0,124
	1434	60	25,7	3,76	0,146
1966	1496	60	32,7	4,6	0,140
	1502	100	30,6	3,89	0,127
	1518	20	30,1	3,73	0,124
	1620	50	36,4	2,96	0,093
	1642	25	35,9	2,82	0,084
1969	1838	50	32,4	3,01	0,091
	1867	50	33,1	2,94	0,089

Таблица 10-5

Место изготовления	Марка или номер партии	Статистические параметры		
		$\bar{U}_{пр}, кв$	$\sigma, кв$	$C$
СССР	481	22,05	4,9	0,24
	530	17,1	3,24	0,19
	569	17,3	3,2	0,185
	803	16,0	1,92	0,12
	915	16,8	2,32	0,138
Англия	—	21,02	4,75	0,226
	—	17,8	2,96	0,166
	—	17,3	2,5	0,145

го материала, а также для выполнения небольших по объему специальных заказов предложенный метод позволяет производить отбор наилучших по однородности партий материалов. Разумеется, сравнение однородности однотипных изоляционных материалов производится в идентичных условиях, т. е. на одинаковых конструкциях проводов и при одинаковых технологических режимах.

В табл. 10-4 приведены данные по однородности фторопласта 40Ш, взятые за 1964—1969 гг. Анализ данных, приведенных в этой таблице, показывает, что для фторопласта 40Ш наблюдалась явная тенденция к стабилизации свойств. Величина однородности на последних партиях фторопласта 40Ш (1967—1969 гг.) достаточно велика, что может служить основой для совершенствования технической документации на этот материал.

Таблица 10-6

Цвет изоляции	Статистические параметры для материалов			
	Полиэтилен ( $S=0,2 \text{ мм}^2$ ; $\delta=0,5 \text{ мм}$ )		Фторопласт 40Ш ( $S=0,5 \text{ мм}^2$ ; $\delta=0,3 \text{ мм}$ )	
	$\bar{U}_{пр}, кв$	$C$	$\bar{U}_{пр}, кв$	$C$
Натуральный	—	—	23,4	0,109
Серый	10,75	0,188	—	—
Красный	10,2	0,24	17,8	0,126
Голубой	13,3	0,134	22,4	0,158
Желтый	11,6	0,157	22,2	0,246
Зеленый	8,7	0,115	—	—
Черный	—	—	18,3	0,127
Белый	—	—	20,4	0,118

Данные табл. 10-5 иллюстрируют возможности отбора лучших партий полиэтилена низкой плотности.

Весьма действенным оказался предложенный метод оценки однородности изоляции при выборе красителей для цветового кодирования проводов с тонкостенной изоляцией. В табл. 10-6 и 10-7 приведены данные по однородности цветных проводов с изоляцией из полиэтилена низкой плотности, фторопласта 40Ш (табл. 10-6) и кремнийорганической резины (табл. 10-7).

Т а б л и ц а 10-7

Цвет изоляции (вид красителя)	Статистические параметры при толщинах изоляции, мм			
	$\delta=0,5$		$\delta=1,2$	
	$\bar{U}_{пр. кв}$	$C$	$\bar{U}_{пр. кв}$	$C$
Белый (окись цинка)	12,3	0,144	21,0	0,103
Кадмий красный	10,4	0,127	18,7	0,110
Кадмий желтый	11,9	0,110	20,0	0,108
Кобальт зеленый	9,8	0,092	16,8	0,063
Зеленый (окись хрома)	10,5	0,082	17,3	0,089
Красный (окись железа)	9,7	0,136	14,7	0,075
Кобальт синий	11,7	0,193	19,8	0,111
Пигмент голубой	10,0	0,211	18,3	0,116

Приведенные выше данные говорят о возможности применения весьма несложного способа отбора красителей для расцветки проводов с тонкостенной изоляцией. При этом весьма примечательны результаты испытаний, приведенные в табл. 10-7. Они еще раз подчеркивают, что предложенный метод оценки однородности эффективен только для проводов с малой толщиной изоляции. При увеличении толщины изоляции (правая колонка табл. 10-7) различия в дисперсности красителей и их способность к гомогенизации, определяемые с помощью величины коэффициента вариации, нивелируются. Оценка однородности проводов с разными видами красителей позволяет не только производить отбор красителей для изготовления проводов, но и давать рекомендации по улучшению технологии их производства с целью получения более приемлемого для изолирования проводов продукта.

## в) Исследование и выбор оптимальных технологических режимов процесса изолирования

Метод динамической оценки однородности проводов с тонкостенной изоляцией может найти эффективное применение при выборе оптимальных технологических режимов процессов изолирования. При этом, разумеется, сравнение различных технологических режимов следует производить на одних и тех же партиях изоляционных материалов.



Рассмотрим ряд примеров, иллюстрирующих некоторые результаты исследований, проведенных на основе этого метода:

Монтажные провода с тонкостенной пленочной изоляцией в виде обмотки из строганных пленок фторопласта 4 (марки МГТФ, СФ и т. д.) требуют термообработки для спекания изоляции и получения монолитного изоляционного слоя. В настоящее время наибольшее

Таблица 10-8

Способ запечки	Статистические параметры		
	$\bar{U}_{пр}, кВ$	$\sigma, кВ$	$C$
Незапеченная изоляция	10,5	1,3	0,120
В воздушной печи	7,1	1,3	0,183
В расплавленном олове	7,93	0,72	0,091

распространение получил способ запечки такой изоляции в горизонтальных воздушных печах, однако он не обеспечивает достаточной однородности изоляции. Значительно лучшие результаты получены

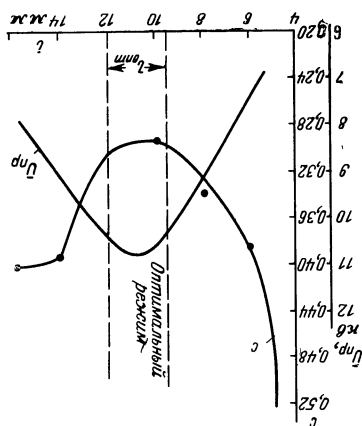


Рис. 10-4. К выбору оптимального технологического режима изготовления проводов с монолитной фторопластовой изоляцией (по данным В. С. Кунегина).

$U_0$  — среднее пробивное напряжение;  $l$  — расстояние от конца дорна до начала цилиндрической части матрицы.

при запечке этих проводов в трубе с расплавленным оловом. В табл. 10-8 приведены сравнительные данные по однородности проводов, термообработанных по тому и другому способу.

Более высокую однородность проводов, запеченных в расплавленном олове, можно объяснить более стабильными температурными условиями термообработки (высокая теплопроводность среды), а также давлением, оказываемым на поверхность провода столбом расплавленного металла (U-образная конструкция печи).

Рисунок 10-4 поясняет методику выбора оптимального расстояния  $l$  от конца дорна до начала цилиндрической части матрицы при экструзии пасты фторопласта 4Д на плунжерном прессе.

Приведенные на этом рисунке графики построены для проводов сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  с толщиной изоляции  $0,45 \text{ мм}$ . Подобные графики весьма характерны для многих случаев выбора оптимальных технологических режимов изолирования. Обращает на себя внимание тот

факт, что минимум кривой коэффициента вариации, соответствующий центру области оптимального режима, совпадает с точкой максимума среднего значения пробивного напряжения. Это указывает на то, что провода, изготовленные в оптимальном режиме, не только более однородны, но и имеют более высокий уровень электрической прочности.

В табл. 10-9 приведены данные по однородности проводов с изоляцией из кремнийорганической резины в зависимости от степени предварительного подогрева токопроводящей жилы ( $S=0,5 \text{ мм}^2$ ,  $\delta=0,4 \text{ мм}$ ,  $l=1 \text{ м}$ ;  $n=50$ ).

Т а б л и ц а 10-9

Температура предварительного подогрева токопроводящей жилы, °С	Статистические параметры	
	$\bar{U}$ , кВ	$C$
Без обогрева	9,6	0,226
60	10,2	0,184
100	10,6	0,110
150	10,5	0,112
200	8,9	0,254

Таким образом, оптимальным режимом с точки зрения максимальной однородности провода является предварительный подогрев жилы до температуры 100—150 °С.

Рассмотренные примеры показывают, что с помощью предложенного метода оценки однородности мы имеем возможность оперативно выбрать оптимальные технологические режимы изготовления проводов с тонкостенной изоляцией. Наличие такой возможности позволяет контролировать технологические процессы с целью поддержания (стабилизации) выбранных оптимальных режимов.

#### 10-4. Выбор минимальных толщин изоляции

В отличие от высоковольтных проводов, где толщина изоляции выбирается по допустимой напряженности электрического поля, в монтажных проводах низкого напряжения выбор толщины изоляции производится из условий достаточной механической прочности и из технологических соображений. Для современных изоляционных материалов, обладающих, как правило, высокой механической прочностью, последнее обстоятельство имеет решающее значение. Выше было показано, что критерием технологичности конструкции провода можно считать величину однородности изоляции. Таким образом, выбор минимальной толщины изоляции проводов должен основываться на методе динамической оценки однородности.

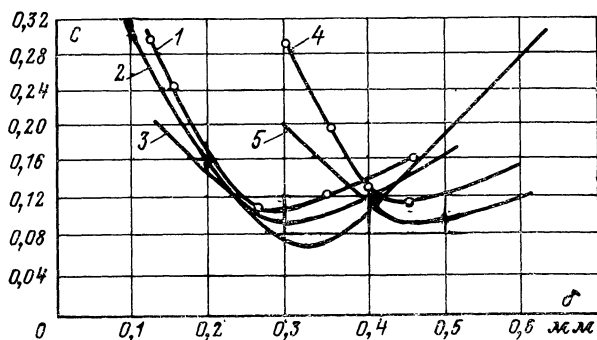


Рис. 10-5. Зависимость  $C=f(\delta)$  для проводов с различной изоляцией.

1 — поливинилхлоридный пластикат; 2 — полиэтилен низкой плотности; 3 — полиэтилен высокой плотности; 4 — фторопласт 4Д; 5 — кремнийорганическая резина.

Рассмотрим вопрос о зависимости величины однородности от толщины изоляции. В табл. 10-10 и на рис. 10-5

Таблица 10-10

Материал изоляции	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Толщина изоляции, мм	Статистические параметры	
			$\bar{U}_{\text{пр}}, \text{кВ}$	C
Поливинилхлоридный пластикат	0,20	0,15	9,2	0,279
		0,20	9,82	0,242
		0,25	11,20	0,106
		0,30	13,6	0,120
		0,40	16,8	0,138
Полиэтилен низкой плотности	0,5	0,20	15,2	0,165
		0,30	19,8	0,08
		0,40	24,2	0,112
Полиэтилен высокой плотности	0,5	0,20	14,3	0,157
		0,30	18,7	0,103
		0,40	23,6	0,126
Фторопласт 4Д	0,5	0,20	4,6	0,46
		0,30	7,2	0,34
		0,40	9,83	0,137
		0,50	11,6	0,149
Кремнийорганическая резина	0,5	0,3	8,4	0,21
		0,4	11,01	0,116
		0,5	13,69	0,099
		0,6	14,94	0,143
		0,7	16,02	0,161

приведены данные по однородности проводов разных типов с разными толщинами изоляции.

Анализ приведенных выше данных показывает, что среднее значение пробивного напряжения, как и следовало ожидать, монотонно возрастает с увеличением толщины изоляции. Что касается величины коэффициента вариации, характеризующего однородность, то налицо U-образный характер этой зависимости. Таким образом, мы вправе говорить об оптимальной с точки зрения однородности толщине изоляции.

По-видимому, снижение однородности проводов при толщинах изоляции, меньших или больших оптимальных, можно объяснить следующим образом.

При сравнительно больших толщинах изоляции однородность проводов ухудшается за счет повышения вероятности появления в изоляции различных дефектов. При прочих равных условиях такая вероятность тем больше, чем больше объем (толщина) изоляции.

При малых толщинах изоляции большой разброс значений пробивных напряжений объясняется прежде всего неотлаженностью технологического процесса изолирования (нестабильность исходного сырья, несовершенство контрольно - измерительной аппаратуры и систем регулирования, качество технологического инструмента и т. д.).

Следует отметить, что оптимальные толщины изоляции для проводов разных типов и сечений, как правило, различны. Это зависит от стабильности материала изоляции и от степени освоения технологии изолирования к моменту эксперимента. В связи с этим необходимо подчеркнуть временный, переходящий характер подобных данных. С их помощью фиксируется уровень технологии на данный момент. Однако любые усовершенствования, как в области синтезирования исходных мате-

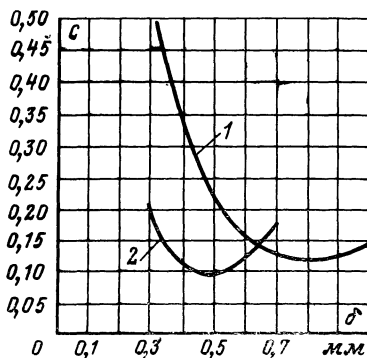


Рис. 10-6. Плотности распределения значения пробивных напряжений проводов с изоляцией из кремнийорганической резины.

1 — данные 1963 г.; 2 — данные 1968 г.

риалов, так и технологии их переработки могут существенным образом изменить рассматриваемые зависимости.

Например, усовершенствования технологии наложения и вулканизации изоляции из кремнийорганической резины за 5 лет (рис. 10-6) дали ощутимый результат—оптимальная с точки зрения однородности толщина изоляции снизилась с 0,7 до 0,4 мм, что дало возможность существенно уменьшить габариты проводов этого типа.

Что касается однотипных проводов разных сечений, то принято увеличивать толщину изоляции с ростом сечения токопроводящих жил. Это объясняется тем, что с увеличением диаметра жилы увеличивается объем изоляции, а следовательно, и вероятность образования в ней разного рода неоднородностей.

Конкретные рекомендации по минимальным толщинам изоляции для проводов разных типов в зависимости от величины рабочего напряжения и сечений токопроводящих жил приведены в приложениях.

## 10-5. Равнотенность изоляции

Выше было показано, что для каждого типа провода существует определенная минимальная толщина изоляции, обеспечивающая работоспособность провода в заданных условиях монтажа и эксплуатации. К сожалению, в процессе изолирования, особенно для проводов с монолитной изоляцией, наложенной методом экструзии, толщина изоляции часто меняется, что вынуждает контролировать этот параметр при сплошных приемо-сдаточных испытаниях. Как правило, для проводов низкого напряжения такой контроль осуществляется путем замера диаметра токопроводящей жилы и наружного диаметра провода с последующим подсчетом толщины изоляции по формуле

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{D - d}{2}, \quad (10-1)$$

где  $D$  — наружный диаметр провода;  $d$  — диаметр токопроводящей жилы.

Такой порядок контроля толщины изоляции был бы достаточным, если бы изоляция провода накладывалась с идеальной концентричностью. На практике любая изоляция эксцентрична.

Рассмотрим поперечное сечение провода (рис. 10-7).

Введем понятие коэффициента равенственности (концентричности) изоляции  $S$ :

$$S = \frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}} 100 \%, \quad (10-2)$$

где  $\delta_{\min}$ ,  $\delta_{\max}$  минимальная и максимальная толщины изоляции в данном поперечном сечении провода.

Тогда при постоянном наружном диаметре провода коэффициент равенственности может колебаться от 0 до 100%, а минимальная толщина изоляции будет изменяться от 0 до величины  $\delta_{\text{ср}}$ . Так, при средней толщине изоляции  $\delta_{\text{ср}} = 0,4 \text{ мм}$  и при коэффициенте равенственности  $S = 100\%$   $\delta_{\min} = \delta_{\text{ср}} = 0,4 \text{ мм}$ ; при  $S = 70\%$   $\delta_{\min} = 0,33 \text{ мм}$ ; при  $S = 30\%$   $\delta_{\min} = 0,18 \text{ мм}$  и т. д.

В табл. 10-11 приведены данные по результатам испытания напряжения проводов разных типов с разной степенью концентричности изоляции. Образцы проводов для определения концентричности изоляции готовились на специальном станке (рис. 10-8), позволяющем разрезать провод не сминая изоляцию.

Измерение минимальной и максимальной толщин изоляции производилось на измерительном микроскопе, обеспечивающем точность не менее  $0,01 \text{ мм}$ .

Данные, приведенные в табл. 10-11, показывают, что снижение степени концентричности изоляции влечет за собой уменьшение величины среднего пробивного напряжения и увеличение разброса их значений, что в конечном итоге приводит к снижению эксплуатационной надежности монтажных проводов. Это происходит потому, что при этом уменьшается минимальная толщина изоляции, которая при прочих равных условиях определяет как электрическую, так и механическую (стойкость к продавливанию и истиранию) прочность монтажных проводов. Поэтому требования по геометрическим размерам монтажных проводов должны содержать не только среднюю (номинальную), но и минимальную толщину изоляции. При этом величина номинальной толщины изоляции, необходимая для определения расчетной массы

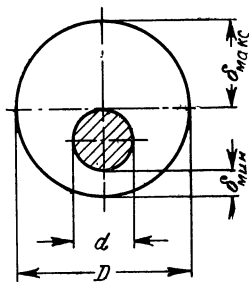


Рис. 10-7. К определению коэффициента равенственности изоляции монтажных проводов.

Таблица 10-11

Вид изоляции	Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Средняя толщина изоляции, мм	Коэффициент равномерности, %	Статистические параметры распределения пробивных напряжений	
				$\bar{U}$ , кВ	$S$
Поливинилхлоридный пластикат	0,35	0,4	70,3	23,5	0,11
			40,5	15,0	0,12
			28,5	10,7	0,13
	0,3	0,3	66,0	20,6	0,06
			36,0	13,0	0,08
			31,0	10,3	0,11
Полиэтилен высокой плотности	0,5	0,3	82,5	19,0	0,07
			51,0	12,2	0,26
	0,4	0,4	83,0	20,0	0,15
			54,5	13,5	0,17
			51,3	12,0	0,21

провода и расхода материалов, должна определяться расчетным путем по заданным величинам минимальной толщины изоляции и коэффициента равномерности. Целесообразность контроля коэффициента равномерности можно обосновать следующим:

поскольку основным требованием к монтажным проводам, используемым в радиоэлектронной аппаратуре, являются минимальные габариты и масса, то при заданной минимальной толщине изоляции ограничение степени концентричности способствует уменьшению величин этих параметров;

методика измерения коэффициента равномерности в принципе аналогична измерению минимальной толщины изоляции (одинаковая подготовка образцов, применение измерительного микроскопа). Это обстоятельство позволяет в условиях производства совмещать указанные измерения, значительно упрощая технологию испытаний;

ограничение степени концентричности изоляции целесообразно, наконец, и из экономических соображений. Если при заданной минимальной толщине изоляции принять расход изоляционного материала при идеальной концентричности ( $S=100\%$ ) за 100%, то при  $S=70\%$  расход материала составит 120%, а при  $S=50\%$  расход будет равен 150%. Если при этом учесть также перерасход защитных и экранирующих материалов, по-видимому,

Т а б л и ц а [10-12]

Вид изоляции	Сечение, мм <sup>2</sup>	Номинальная толщина изоля- ции, мм	Коэффициент равноценности, %
Поливинилхлоридный пластикат	0,2	0,2 0,3	75,5—92 79—97
	0,5	0,3 0,4	73—89 75—91
	1,5	0,2 0,3 0,4	50—62 61—75 80—94
Полиэтилен      низкой плотности	0,2	0,2 0,3	56—86 76—91
	0,5	0,3 0,4	69—92 74—94
	1,5	0,3	62—92
Полиэтилен      высокой плотности	0,2	0,2 0,3	66—88 64—84
	1,5	0,2 0,4	50—70 70—90
Фторопласт 4Д	0,35	0,45 0,4	79—81 73—91
	0,5	0,5	73—88
Фторопласт 4 (плен- ки)	0,2	0,3	77—89
	0,5	0,3	79—97
Лавсан (пленки)	0,2	0,2	70—90

ограничение степени концентричности изоляции может дать весьма внушительный экономический эффект. Поскольку степень концентричности изоляции зависит от уровня технологии изолирования, указанные ограничения были определены после широкой серии испытаний проводов, изготовленных на разных кабельных заводах. Результаты этих испытаний приведены в табл. 10-12.

Анализ данных, приведенных в табл. 10-12, позволяет сделать следующие выводы:

степень концентричности проводов с пленочной изоляцией в большинстве случаев выше, чем проводов с моно-



литной изоляцией, полученной методом экструзии. Этот вывод подтверждается и некоторыми зарубежными данными. Так, американская фирма Tensolite Insulated Wire Co. рекламирует провода с пленочной изоляцией из поли-

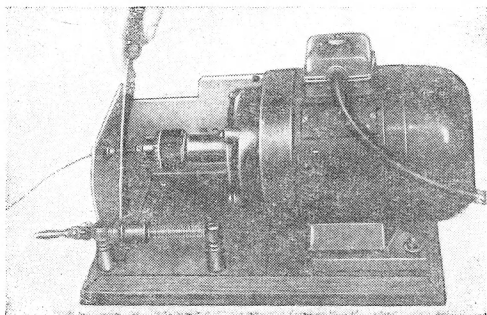


Рис. 10-8. Станок для подготовки образцов при определении коэффициента равенственности монтажных проводов.

тетрафторэтилена типа flexolon и приводит следующие сравнительные данные по степени концентричности этих проводов и проводов с выдавленной изоляцией (табл. 10-13);

для проводов с монолитной изоляцией, полученной методом экструзии, с учетом существующего уровня технологии величина коэффициента равенственности должна быть не менее 70%. Следует отметить, что именно такая

Таблица 10-13

Тип провода по стандарту MIL-W-16878	Рабочее напряжение, в	Номинальная толщина изоляции, мм	Вид изоляции	Концентричность, %
Е	600	0,25	Flexolon	88,9
			Монолитная	75,6
ЕЕ	1 000	0,37	Flexolon	91,0
			Монолитная	82,5

величина регламентирована американским стандартом на монтажные провода MIL-W-16878;

для проводов с изоляцией в виде спиральной обмотки лентами (фторопласт 4, лавсан и т. д.) величина этого коэффициента должна быть не менее 80%.

## **10-6. Провода с комбинированной изоляцией**

В настоящее время выпускаются монтажные провода с комбинированной волокнисто-пластмассовой изоляцией и изоляцией из дублированных пленок.

В первом случае наибольшее распространение получили следующие виды изоляции:

- шелк + поливинилхлоридный пластикат;
- стеклонить + поливинилхлоридный пластикат;
- стеклонить + полиэтилен высокой плотности;
- стеклонить + политетрафторэтилен.

В табл. 10-14 приведены сравнительные данные по наружным размерам, массам и однородности проводов со сплошной и комбинированной изоляцией.

Анализ данных, приведенных в этой таблице, показывает, что наружные диаметры проводов с комбинированной изоляцией увеличиваются по сравнению с аналогичными проводами со сплошной изоляцией в среднем на 18%. Соответственно масса проводов с комбинированной изоляцией увеличивается в среднем на 16%. Величина среднего пробивного напряжения проводов с комбинированной изоляцией, как правило, ниже, чем у проводов со сплошной изоляцией, а коэффициент вариации обычно выше, что можно объяснить более сложной конструкцией и удлинением технологического цикла изготовления таких проводов. Однако меньшая однородность проводов с комбинированной изоляцией не снижает величины их эксплуатационной надежности, так как стойкость к воздействию различных механических и климатических факторов у таких проводов намного выше, чем у проводов со сплошной изоляцией. Применение проводов с комбинированной волокнисто-пластмассовой изоляцией следует рекомендовать в тех случаях, когда по условиям эксплуатации провода подвергаются воздействию значительных продавливающих нагрузок, а также требуется одноразовое их использование при повышенных температурах. Кроме того, высокая надежность проводов с комбиниро-

Таблица 10-14

Тип изоляции	Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Наружный диаметр, мм	Расчетная масса, кг/км	Статистические параметры распределения пробивных напряжений			
				в исходном состоянии		после 100 ч пребывания при максимальной температуре с одновременным продавливанием	
				$\bar{U}_{пр'}$ кв	C	$\bar{U}_{пр'}$ кв	C
Поливинилхлорид	0,20	1,2	3,25	15,0	0,06	10,2	0,13
	0,50	1,5	6,28	16,0	0,09	11,3	0,12
	1,5	2,2	16,77	17,9	0,10	12,0	0,13
Стеклонить + поливинилхлорид	0,20	1,48	4,07	9,0	0,14	8,5	0,14
	0,50	1,78	7,23	9,2	0,12	9,0	0,13
	1,5	2,48	18,23	13,0	0,12	10,8	0,15
Полиэтилен высокой плотности	0,20	1,2	2,99	17,2	0,11	12,1	0,14
	0,50	1,5	5,92	16,8	0,11	12,8	0,16
	1,5	2,2	16,23	21,2	0,12	18,2	0,15
Стеклонить + полиэтилен высокой плотности	0,20	1,48	3,73	9,2	0,11	9,0	0,14
	0,50	1,78	6,89	10	0,12	9,6	0,15
	1,5	2,48	17,63	10,2	0,12	9,4	0,15
Фторопласт 4	0,20	1,2	4,02	13,0	0,04	13,0	0,10
	0,50	1,5	7,2	11,6	0,06	12,0	0,12
	1,5	2,2	18,3	12,5	0,11	12,0	0,13
Стеклонить + фторопласт 4	0,20	1,48	5,13	8,0	0,12	8,0	0,11
	0,50	1,78	8,5	11,8	0,11	11,0	0,12
	1,5	2,48	20,12	7,7	0,13	7,5	0,14

ванной изоляцией делает целесообразным их применение для особо ответственной аппаратуры.

Принципиально новыми и весьма перспективными являются провода с комбинированной изоляцией из дублированных пленок. Как указывалось выше, такие провода могут изготавливаться с изоляцией на основе полиэтилентерефталата — полиэтилена с рабочей температурой +80°C и на основе полиимида — фторированного этиленпропилена с рабочей температурой +200°C. Принципиальной особенностью проводов с такой изоляцией является возможность сохранения и даже уменьшения наружных размеров и масс при повышенной стойкости к продавливающим нагрузкам и кратковременным перегревам.

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭКРАНОВ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ

### 11-1. Виды экранов монтажных проводов

В настоящее время в качестве экранов монтажных проводов, как правило, применяются оплетки из медных проволок. Для экранирующих оплеток используется медная луженая, медная посеребренная или медная никелированная проволока.

В гл. 9 изложены принципы выбора антикоррозионных покрытий проволоки в зависимости от максимальной температуры эксплуатации.

Следует отметить, что в последние годы у нас и за рубежом ведутся работы по применению для экранов монтажных проводов металлической фольги, металлизированных пластмассовых пленок, по наполнению пластмасс с целью придания им проводящих и магнитных свойств вакуумному и электрохимическому нанесению металлических покрытий на поверхность изоляции и т. д.

Работы в этом направлении преследуют цель заменить сравнительно непроизводительную технологическую операцию оплетки более производительными, сократить излишний расход меди, уменьшить массу проводной сети при максимальном сохранении экранирующего эффекта оболочек.

Однако до настоящего времени экраны в виде проволочных оплеток остаются основной и практически единственной конструкцией экранов малогабаритных монтажных проводов. Определенный консерватизм в области конструкций экранов монтажных проводов объясняется универсальностью оплетки, пока непревзойденным сочетанием экранирующих характеристик и устойчивостью к механическим воздействиям при эксплуатации. Поэтому мы рассматриваем характеристики и принципы конструирования экранов монтажных проводов только в виде проволочных оплеток.

Оплетка представляет собой оболочку, образованную двумя группами прядей (пасм), имеющих разное направление и переплетающихся между собой в определенном порядке. Прядь может состоять как из одной, так и из нескольких проволок. Для оплеток монтажных проводов

обычно применяется круглая проволока диаметром 0,10—0,15 мм. Оплетки, выполненные из плоских проволок, хотя и имеют ряд преимуществ, но практически не применяются из-за технологических сложностей.

В зависимости от типа оплеточной машины и способа ее заправки можно получить различные переплетения прядей. Наиболее распространенным переплетением является система 2—2 (рис. 11-1,а), при которой проволоки одной пряди, перекрыв две пряди противоположного на-

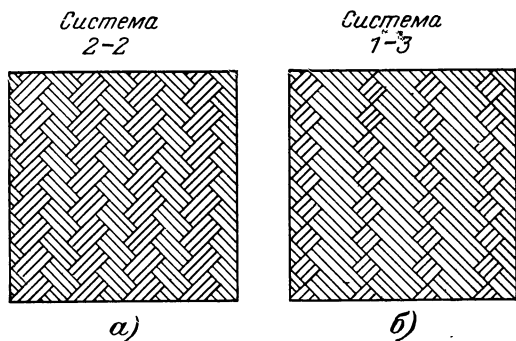


Рис. 11-1. Схемы переплетения пасм.  
а — система 2—2; б — система 1—3.

правления, проходят под двумя следующими прядями. Могут быть также переплетения системы 1—2; 1—3 (рис. 11-1,б) и т. д.

При равном числе проволок левого и правого направления оплетки называются симметричными; при неравном — несимметричными.

Степень несимметричности оплеток может быть охарактеризована величиной коэффициента несимметричности  $k_n$ , который равен отношению большего числа проволок, имеющих одно направление, к числу проволок противоположного направления. Например, если общее число проволок левого направления равно 24, а правого 6, то  $k_n = 24/6 = 4$ . Для симметричных оплеток  $k_n = 1$ . Чаще всего применяются симметричные оплетки. Вопрос о возможности применения несимметричных оплеток будет рассмотрен ниже.

Рассмотрим основные геометрические соотношения параметров оплетки на примере развертки прядей одного

направления на длине одного шага (рис. 11-2). Конструкция оплетки будет полностью определена, если известны все характеризующие ее переменные величины. Примем следующие обозначения:  $t$  — толщина оплетки, мм;  $h$  — шаг оплетки, мм;  $\alpha$  — угол наложения оплетки, град;  $D$  — средний диаметр оплетки, мм;  $D_{\text{пр}}$  — диаметр провода по изоляции (диаметр под оплеткой), мм;  $d$  — диаметр проволок оплетки, мм;  $a_1, a_2$  — число прядей соответственно левого и правого направлений;  $b_1, b_2$  — число проволок в прядях соответственно левого и правого направлений.

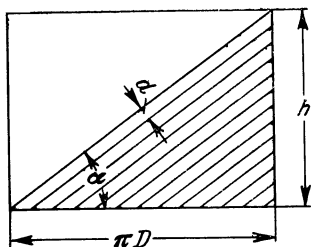


Рис. 11-2. Схема оплетки.

Из схемы, приведенной на рис. 11-2, видно, что величины  $h$ ,  $\alpha$ ,  $D$  связаны между собой следующими соотношениями:

$$h = \pi D \operatorname{tg} \alpha; \quad (11-1)$$

$$D = D_{\text{пр}} + 2d. \quad (11-2)$$

Толщина оплетки  $t$  равна удвоенному диаметру проволок оплетки.

Чем меньше угол  $\alpha$ , тем оплетка механически устойчивее. С увеличением угла  $\alpha$  оплетка приобретает склонность расходиться при изгибах провода.

Совокупность параметров  $h$ ,  $\alpha$ ,  $D_{\text{пр}}$ ,  $d$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  определяет плотность оплетки.

Различают линейную  $P_l$  и поверхностную  $P_s$  плотности оплетки. Линейная плотность оплетки  $P_l$  показывает, какая часть поверхности провода по отношению к общей его поверхности покрыта прядями одного направления. Линейная плотность обычно выражается в относительных единицах. Поверхностная плотность выражается как процентное соотношение площади поверхности провода, покрытой прядями обоих направлений, к площади поверхности всего провода.

Простые выкладки при рассмотрении геометрии рисунка оплетки приводят к следующим соотношениям между параметрами оплетки и величинами линейной и

поверхностной плотностей оплетки:

$$P_{l1} = \frac{a_1 b_1 d}{h \cos \alpha}; \quad (11-3)$$

$$P_{l2} = \frac{a_2 b_2 d}{h \cos \alpha}; \quad (11-4)$$

$$P_s = (P_{l1} + P_{l2} - P_{l1} P_{l2}) \cdot 100\%, \quad (11-5)$$

где  $P_{l1}$  и  $P_{l2}$  — линейные плотности для прядей соответственно левого и правого направлений.

Коэффициент несимметричности  $k_n$  может быть тогда выражен через отношение линейных плотностей  $P_{l1}$  и  $P_{l2}$   $k_n = P_{l1}/P_{l2}$ , причем  $P_{l1} \geq P_{l2}$ .

Масса оплетки выражается следующим соотношением:

$$A = \frac{(a_1 b_1 + a_2 b_2) \pi d^2 \gamma}{4 \sin \alpha}, \quad (11-6)$$

где  $\gamma$  — плотность металла оплетки.

Для симметричных оплеток

$$A = \frac{2ab\pi d^2 \gamma}{4 \sin \alpha}. \quad (11-7)$$

Первичными конструктивными параметрами оплетки будем считать  $D$ ;  $d$ ;  $\alpha$ ;  $k_n$  и общее число проволок. Шаг оплетки  $h$ , масса  $A$  и поверхностная плотность  $P_s$  являются производными от основных параметров и определяются формулами (11-2) — (11-7).

Параметры оплетки  $d$ ,  $\alpha$ ,  $k_n$  определяют технологический режим наложения оплетки и ее экранирующие характеристики.

## 11-2. Оптимальные соотношения конструктивных параметров оплетки

### а) Общие сведения

При выборе конструктивных параметров оплетки следует исходить из условия, что экран монтажного провода должен обеспечивать при фиксированной массе максимальную помехозащищенность. При этом необходимо иметь в виду, что оплетка должна быть механически устойчива.

Выше было отмечено, что механическая устойчивость оплетки зависит от угла  $\alpha$  наложения оплетки. Чем боль-

ше угол  $\alpha$ , тем меньшей механической устойчивостью обладает оплетка. Обычно угол оплетки лежит в интервале  $35-70^\circ$ . При этом оплетка сохраняет необходимую механическую устойчивость.

Угол оплетки определяет производительность технологического процесса наложения оплетки при изготовлении монтажных экранированных проводов, а следовательно, и их стоимость и требуемые производственные площади. Экранирующий эффект оплетки зависит как от угла наложения, так и от плотности, коэффициента несимметричности  $k_n$  и диаметра  $d$  проволок оплетки. Эти параметры при заданном наружном диаметре по изоляции провода полностью определяют конструкцию оплетки. Для правильного выбора конструкции оплетки необходимо установить количественные соотношения между массой экрана, параметрами оплеток и их экранирующими характеристиками.

Экранирующие характеристики оплеток проще всего оценивать с помощью величины сопротивления связи  $z_s$  и величины относительной емкостной проницаемости  $k_\epsilon$  (см. § 2-4).

На рис. 11-3 представлены характерные частотные зависимости сопротивления связи для экранов различных конструкций. Сопротивление связи однородного металлического экрана (кривая 1 на рис. 11-3) уменьшается с возрастанием частоты в соответствии с формулой (2-49).

Начало кривой ( $f=0$ ) соответствует сопротивлению экрана постоянному току. Сопротивление связи экрана, выполненного в виде обмотки металлическими лентами (кривая 2), имеет возрастающий характер при увеличении частоты.

Прямолинейный характер последнего участка свидетельствует о наличии индуктивной составляющей со-

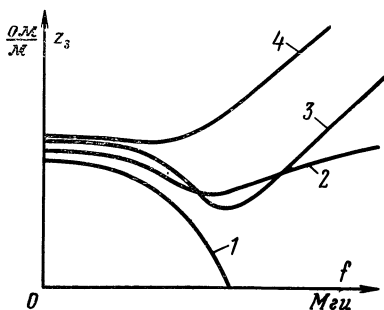


Рис. 11-3. Зависимость сопротивления связи от частоты для сплошной медной трубки (кривая 1), обмотки металлическими лентами (кривая 2) и оплеток (кривые 3 и 4) из медных проволок.



противления связи. Поэтому сопротивление связи экрана в виде обмотки можно представить состоящим из двух частей: участка, уменьшающегося при уменьшении частоты вследствие поверхностного эффекта и подчиняющегося закономерности, определяемой кривой 1, и участка индуктивного характера, вызванного эффектом спиральности.

Аналогичный характер имеет зависимость сопротивления связи от частоты для оплеток (кривые 3 и 4 на рис. 11-3). Наличие на кривой 3 характерного провала или его отсутствие (кривая 4) зависят от соотношения активных и реактивных составляющих сопротивления связи. Поэтому сопротивление связи для экранов, выполненных в виде оплеток и обмоток, можно представить формулой

$$Z_s = Z_{стр} + j\omega L_s, \quad (11-8)$$

где  $Z_{стр}$  — сопротивление связи сплошной трубки с соответствующим оплетке (обмотке) сопротивлением постоянному току.

Сопротивление  $Z_{стр}$  определяется из выражения

$$Z_{стр} = R \frac{jkD}{sh\ jkD}, \quad (11-9)$$

где  $R$  — сопротивление постоянному току экрана;  $D$  — средний диаметр экрана.

Индуктивность оплетки должна зависеть от угла оплетки, возрастая с его уменьшением.

Что касается зависимости коэффициента рассеяния от конструктивных параметров оплетки, то этот вопрос остается открытым и получить расчетные формулы для коэффициентов рассеяния пока не удастся.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния конструктивных параметров оплетки на величину сопротивления связи в интервале частот до 9 МГц.

## 6) Зависимость величины сопротивления связи от параметров оплетки

Прежде чем перейти к рассмотрению характеристики сопротивления связи, выясним влияние параметров конструкции оплетки на величину относительной емкостной проницаемости. Все исследования проводились на образ-

цах провода с полиэтиленовой изоляцией сечением 0,20; 0,5 и 0,75 мм<sup>2</sup> (наружные диаметры 1,25; 1,60 и 2,04 мм).

На рис. 11-4 приведена зависимость величины относительной емкостной проникаемости экрана провода, выполненного в виде симметричной ( $k_H=1$ ) оплетки и обмотки ( $k_H=\infty$ ), от поверхностной плотности экрана. Оплетка выполнена с углом наложения 60°, а обмотка — с углом 15°.

Из рис. 11-4 следует, что величина относительной емкостной проникаемости  $k_C$  практически не зависит от плотности экрана в интервале 50—100% и коэффициента несимметричности. Угол наложения обмотки и оплетки, как и следовало ожидать, также не сказывается на величине  $k_C$ . Так как оплетки с плотностью ниже 50% не применяются при производстве монтажных проводов, можно ожидать, что экранирующие характеристики оплеток будут определяться только величиной сопротивления связи.

На рис. 11-5 приведена зависимость величины сопротивления связи от угла наложения  $\alpha$  симметричных оплеток для частот 1,5 и 9 Мгц. Заданная плотность сохранялась изменением числа проволок в пасме. Приведенные кривые свидетельствуют о резко выраженной зависимости величины сопротивления связи от угла наложения симметричных оплеток, причем изменение плотности оп-

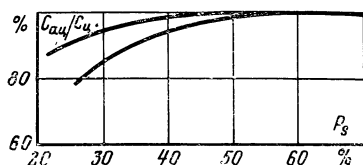


Рис. 11-4. Зависимость относительной емкостной проникаемости экрана в виде оплетки (верхняя кривая) и обмотки (нижняя кривая) от поверхностной плотности экрана.

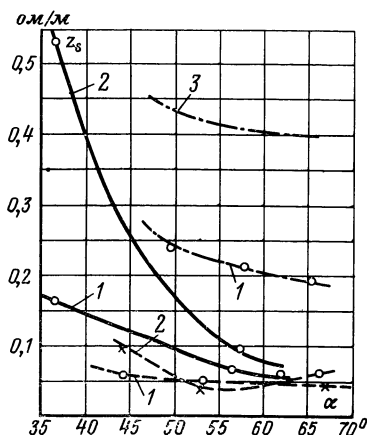


Рис. 11-5. Зависимость сопротивления связи от угла  $\alpha$  для симметричных оплеток (провод сечением 0,75 мм<sup>2</sup>, диаметром 0,10 мм).

Плотность оплетки 90% — пунктирные линии, то же 70% — сплошные линии, то же 30% — штрихпунктирные линии. 1 — при частоте 1 Мгц; 2 — при частоте 9 Мгц; 3 — при частоте 5 Мгц.

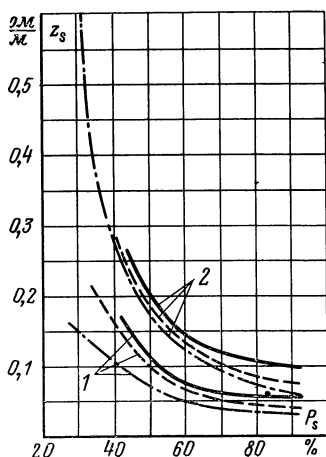


Рис. 11-6. Зависимость сопротивления связи от плотности для симметричной оплетки (диаметр провода 0,12 мм,  $\alpha=57\div 65^\circ$ ).

Провод сечением 0,20 мм<sup>2</sup> — сплошные линии, то же 0,50 мм<sup>2</sup> — пунктирные линии, то же 0,75 мм<sup>2</sup> — штрихпунктирные линии. 1 — при частоте 1 Мгц; 2 — при частоте 9 Мгц.

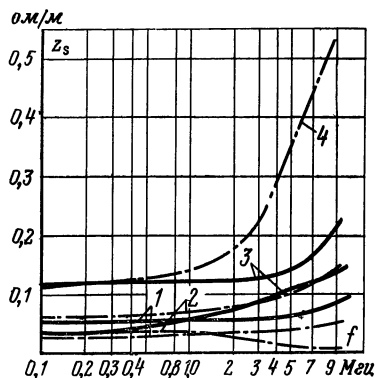


Рис. 11-7. Зависимость величины сопротивления связи от частоты для симметричных оплеток.

1 — плотность оплетки 90%; 2 — плотность оплетки 50%; 3 — плотность оплетки 42%; 4 — плотность оплетки 30%. Провод сечением 0,20 мм<sup>2</sup> — сплошные линии, то же 0,75 мм<sup>2</sup> — штрихпунктирные.

летки не изменяет характера зависимости сопротивления связи от угла наложения оплетки.

С увеличением частоты зависимость величины сопротивления связи от угла наложения оплетки возрастает за счет увеличения ее индуктивности  $L_s$ . С увеличением угла наложения оплетки абсолютная величина  $Z_s$  уменьшается и эффект экранирования увеличивается. Однако следует учитывать, что при увеличении угла оплетки выше  $65\text{—}70^\circ$  оплетка теряет механическую устойчивость. Практически для стандартного оборудования угол оплетки может быть рекомендован в интервале  $55\text{—}67^\circ$ .

На рис. 11-6 приведена зависимость величины сопротивления связи от плотности экрана. Очевидно, что с увеличением плотности уменьшается величина сопротивления связи. Зависимость  $Z_s$  от плотности оплетки носит гиперболический характер. При частоте 1 Мгц величина  $Z_s$  при плотности оплетки выше  $60\text{—}65\%$  остается почти постоянной.

С увеличением частоты начало практически горизонтального участка кривой зависимости сопро-

тивления связи от плотности оплетки сдвигается в сторону увеличения плотности. Для частоты 9 Мгц начало горизонтального участка кривой находится в области плотности оплетки 70—75%. Частотная зависимость величины сопротивления связи оплеток с различной плотностью приведена на рис. 11-7.

Как и следовало ожидать, с увеличением диаметра оплетки (сечения провода) величина  $z_s$  несколько уменьшается. Из кривых, приведенных на рис. 11-5 и 11-6, видно, что с уменьшением плотности оплетки увеличивается зависимость от частоты. Если для плотности оплетки 90 и 70% (кривые 1 и 2 на рис. 11-5) величина  $z_s$  практически не зависит от частоты вплоть до частоты 10 Мгц, то для плотности оплетки 40% резкий рост величины  $z_s$  наблюдается начиная от частот примерно 1—2 Мгц. Это обстоятельство может быть объяснено увеличением индуктивности рассеивания оплетки за счет проникновения поля сквозь ее отверстия, увеличивающиеся при уменьшении плотности оплетки. Резкого роста величины  $z_s$  для оплеток с плотностью 70% и выше следует ожидать при частотах помехонесущего поля свыше 10 Мгц.

Таким образом, в интервале частот до 10 Мгц, т. е. в основном интервале частот помехонесущего поля, в котором работают монтажные провода в реальных условиях эксплуатации, величины сопротивления связи для симметричных оплеток с плотностью 70% и выше практически не зависят от частоты.

Величина сопротивления связи в этом интервале частот не зависит от плотности симметричных оплеток в интервале 70—100%. Поэтому оптимальной плотностью оплетки для экранов монтажных проводов является плотность 70—75%. Для более низких частот помехоне-

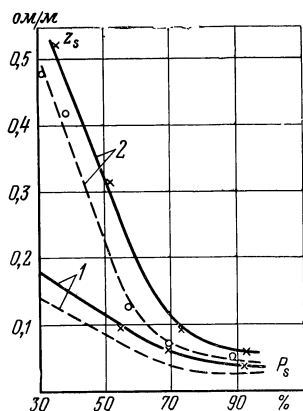


Рис. 11-8. Зависимость сопротивления связи от плотности оплетки для различных диаметров проволок оплетки (сечение 0,75 мм<sup>2</sup>;  $\alpha = 60 \div 70^\circ$ ).

Диаметр проволоки 0,10 мм — сплошные линии, то же 0,12 мм — пунктирные линии. 1 — при частоте 1 Мгц; 2 — при частоте 9 Мгц.

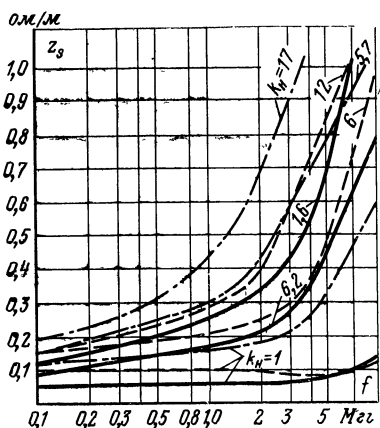


Рис. 11-9. Зависимость сопротивления связи оплеток с различными значениями коэффициента несимметричности и плотности от частоты.

Плотность экрана 90% — сплошные линии, то же 70% — пунктирные линии, то же 50% — штрихпунктирные линии.

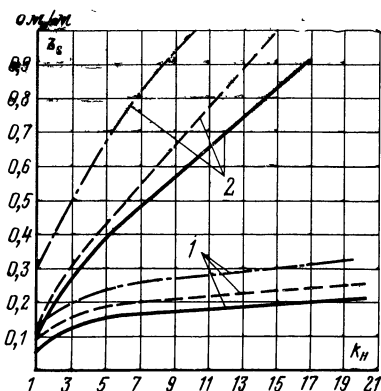


Рис. 11-10. Зависимость сопротивления связи от коэффициента несимметричности оплетки.

Плотность экрана 90% — сплошные линии, то же 70% — пунктирные линии, 50% — штрихпунктирные линии. 1 — при частоте 0,5 МГц; 2 — при частоте 5 МГц.

сушего поля величина оптимальной плотности сдвигается, в сторону уменьшения плотности. Для частот помехонесущего поля выше 10 МГц плотность, по-видимому, должна быть увеличена.

На рис. 11-8 приведена зависимость величины сопротивления связи для оплеток из медной луженой проволоки 0,10 и 0,12 мм от плотности оплетки. Все конструктивные параметры оплеток, за исключением диаметра проволок, идентичны.

Из кривых рис. 11-8 следует, что величина  $z_s$  одинаково зависит от плотности оплетки и частоты помехонесущего поля независимо от диаметра проволок оплетки.

Угол наклона этих кривых к оси абсцисс одинаков. Это свидетельствует о том, что индуктивное сопротивление  $\omega L_s$  для этих оплеток также одинаково.

С увеличением коэффициента несимметричности при фиксированных частотах и постоянных плотностях и угле оплетки (рис. 11-9) величина  $z_s$  возрастает. С увеличением частоты помехонесущего поля  $z_s$  также увеличивается, причем тем быстрее, чем больше величины  $k_H$ . Такой харак-

тер зависимости величины  $z_s$  от частоты можно объяснить тем, что с возрастанием  $k_H$  увеличивается величина индуктивности оплетки. Максимальное значение индуктивности получим (при прочих равных условиях) при  $k_H = \infty$ . Но это обстоятельство указывает возрастающий наклон прямолинейных участков характеристики  $z_s$  в функции частоты с увеличением  $k_H$ .

Анализ кривых (рис. 11-5—11-11) позволяет установить количественные закономерности изменения величины сопротивления связи оплеток — экранов монтажных проводов в зависимости от их конструктивных параметров в интервале частот до 10 МГц.

Для выбора оптимальной конструкции оплетки произведем анализ приведенных данных с учетом массовых характеристик экранов. На рис. 11-12 и 11-13 приведены зависимости массы оплетки от ее конструктивных параметров. При фиксированных конструктивных параметрах оплетки ее масса практически не зависит от угла наложения прядей. Из рис. 11-5 и 11-6 следует, что уменьшение угла и плотности оплетки вызывает увеличение сопротивления связи, причем изменение величины угла наложения симметричной оплетки с 65 до 45° эквивалентно снижению плотности с 70 до 50% для частоты помехонесущего поля 1 МГц и с 70 до 57% — для частоты 9 МГц. При этом сопротивление связи для таких оплеток остается постоянным. Это значит, что при уменьшении угла наложения с 65 до 45° для получения того же экранирующего эффекта для оплетки необходимо увеличить плотность (и массу) оплетки соответственно на 35—40% (см. рис. 11-5, 11-6 и 11-12).

Замена оплетки из медной проволоки  $\varnothing 0,12$  мм оплеткой из медной проволоки  $\varnothing 0,10$  мм той же плотности и

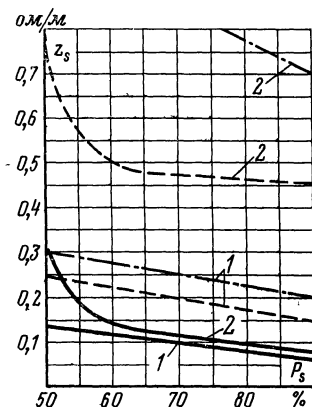


Рис. 11-11. Зависимость величины сопротивления связи от плотности оплетки при различных коэффициентах несимметричности.

$k_H=1$  — сплошные линии;  
 $k_H=6$  — пунктирные линии;  
 $k_H=16$  — штрихпунктирные линии.  
 1 — при частоте 0,5 МГц, 2 — при частоте 5 МГц.

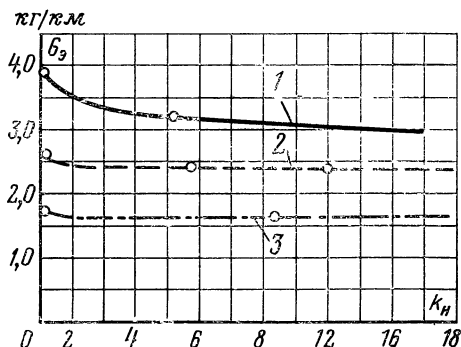


Рис. 11-12. Зависимость массы симметричной оплетки из медной проволоки диаметром 0,10 мм от плотности экрана.

1 — для сечения провода 0,20 мм²; 2 — для сечения провода 0,5 мм²; 3 — для сечения провода 0,75 мм².

с тем же углом эквивалентна уменьшению плотности оплетки из проволоки 0,12 мм на 10% при сохранении той же величины сопротивления связи.

Из кривых, представленных на рис. 11-8 и 11-12, следует, что применение экранов в виде оплеток плотностью не ниже 65% из медных проволок  $\varnothing 0,10$  мм вместо  $\varnothing 0,12$  мм не дает снижения массы при условии сохранения первоначальной величины сопротивления связи. При снижении плотности оплетки ниже этого уровня имеет смысл переходить на оплетку из медных проволок  $\varnothing 0,10$  мм. При этом тот же экранирующий эффект обеспечивается оплеткой меньшей массы.

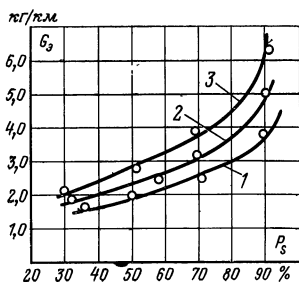


Рис. 11-13. Зависимость массы оплетки из медной проволоки диаметром 0,10 мм от коэффициента несимметричности.

1 — плотность экрана 90%; 2 — плотность экрана 70%; 3 — плотность экрана 50%.

Из рис. 11-6, 11-8 и 11-11 следует, что при плотности оплетки 90% увеличение коэффициента несимметричности оплетки до значения  $k_H = 5$  обеспечивает снижение массы экрана на 20%; до  $k_H = 10$  — на 25% сравнительно с массой симметричной оплетки той же плотности. При дальнейшем увеличении коэффициента несимметричности масса экрана практически не изменяется. Со снижением

плотности до 70% и ниже величина  $k_n$  не сказывается на массе экрана. При этом, учитывая соотношения массы оплетки и величины сопротивления связи (рис. 11-11 и 11-12), можно убедиться, что симметричная оплетка всюду оказывается выгоднее несимметричной. С увеличением частоты помехонесущего поля преимущество симметричной оплетки возрастает. Например, величина сопротивления связи несимметричной оплетки плотностью 80% и значением  $k_n=3$  (рис. 11-11) при частоте 0,5 Мгц соответствует величине сопротивления связи симметричной оплетки с плотностью 40% (рис. 11-6) при частоте 5 Мгц.

Это означает, что в случае применения несимметричных оплеток взамен симметричных с той же величиной сопротивления связи, а следовательно, с тем же значением величины экранного затухания масса экрана будет увеличена на 50—60% (рис. 11-11 и 11-12). Этот вывод важен, поскольку при выпуске монтажных экранированных проводов для экономии меди иногда ставится вопрос о замене симметричных экранов на несимметричные. Таким образом, рекомендации по конструкции проводочных экранов для монтажных проводов могут быть сформулированы следующим образом:

1. Экраны для монтажных проводов должны быть выполнены только в виде симметричных оплеток. Применение несимметричных оплеток влечет за собой снижение экранирующих характеристик провода и приводит к перерасходу медной проволоки при попытке получить те же экранные характеристики.

2. Уменьшение массы экрана при заданном из тех или иных соображений диаметре проволок оплетки может быть достигнуто только при уменьшении плотности оплетки. При этом уменьшение величины экранного затухания будет минимально возможным.

3. Угол оплетки должен быть не менее 55° и выбираться возможно большим, но не превышать 70°.

4. Оптимальная плотность оплетки равна 70—75% для монтажных проводов, предназначенных для работы при частоте помехонесущего поля до 10 Мгц, т. е. для проводов массового применения. Увеличение плотности оплетки выше этого значения влечет за собой необоснованный перерасход цветных металлов и увеличение массы провода. Если экранированный провод предназначен для работы в помехонесущем поле с существенно большей частотой, плотность оплетки может быть повышена.



## КОНСТРУИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРОВОВ

### 12-1. Назначение защитных покровов

Монтажные провода с пластмассовой изоляцией, используемые для монтажа внутри приборов и аппаратов, применяются, как правило, без специальных защитных покровов. Наряду с этим провода, предназначенные для одиночного и в особенности для группового межблочного монтажа, в ряде случаев снабжаются защитными оболочками.

Основным назначением защитной оболочки является предохранение изоляционного слоя от механических повреждений при монтаже и во время эксплуатации. Таким образом, защитные покровы монтажных проводов прежде всего повышают механические характеристики проводов (стойкость к истиранию, продавливанию, порезам, местным перегревам при пайке и т. д.). Кроме того, наличие защитных покровов в ряде случаев позволяет кратковременно использовать провода при повышенных температурах. Особую роль играют защитные оболочки в экранированных монтажных проводах. С одной стороны, провололочные экраны (оплетки) способны повредить изоляцию провода как при его изготовлении, так и во время эксплуатации, что особенно опасно. Проволоки оплетки, коротко подстриженные на оплеточных машинах в местах обрыва или схода проволоки с катушки, способны проколоть изоляцию, причем такой прокол может произойти не сразу, а в процессе монтажных или эксплуатационных изгибов провода; таким образом, не исключена возможность, что прокол изоляции обнаружится уже во время эксплуатации.

С другой стороны, незащищенный экран, выполняемый обычно из тонких проволок, легко может быть поврежден при монтаже, в особенности в тех случаях, когда провод должен протягиваться в узкие отверстия или щели.

Таким образом, необходимо защищать не только изоляцию провода от проколов проволоки оплетки, но и сам экран, чтобы исключить его повреждение и возможные проколы соседних проводов проволоками поврежденного экрана.

Основные требования, предъявляемые к материалам и конструкциям защитных оболочек, перечислены ниже.

1. Материалы защитных покровов должны быть стойкими к механическим воздействиям. Это требование диктуется тем, что при возможных в эксплуатации продавливающих нагрузках основное усилие должно приходиться на защитную оболочку, а не на изоляционный слой, определяющий электрическую прочность провода. В этом и заключается основное отличие проводов с защитными покровами от проводов с комбинированной изоляцией.

2. Материалы, применяемые для защитных покровов, по теплостойкости должны быть не ниже материалов изоляции. Выполнение этого требования позволяет полностью использовать тепловые характеристики материала изоляции и, как правило, значительно повысить кратковременную нагревостойкость провода.

Следует, однако, иметь в виду, что в некоторых случаях провода, предназначенные для разового использования при повышенных температурах, могут иметь так называемую консервирующую оболочку из нетеплостойкого материала, назначение которой заключается в предохранении изоляции провода от механических повреждений и особенно от увлажнения при длительном хранении, монтаже и эксплуатации при нормальной температуре. При установке и включении аппаратуры такая оболочка, завершив свои функции, выгорает, а провод, благодаря теплостойкому изоляционному слою, остается пригодным для работы.

3. Конструкции защитных покровов не должны существенно увеличивать габариты и массы проводов, а также снижать их гибкость.

Сочетание противоречивых требований высокой механической прочности защитной оболочки и ее минимально возможной толщины значительно сокращает количество материалов, которые могут быть использованы для этих целей. При этом технологичность материала, т. е. способность его при достигнутом уровне технологии быть наложенным стабильным тонким слоем, имеет наиболее существенное значение, так же как и при выборе изоляционных материалов. Что касается гибкости проводов с монолитными защитными оболочками, то достаточное сохранение этого параметра может быть достигнуто только за счет применения весьма малых толщин оболочек.

По конструктивному выполнению существуют две разновидности защитных покровов монтажных проводов: защитная оболочка в виде монолитного слоя и покровов в виде оплетки из нитей, пропитанных лаками.

## 12-2. Защитные оболочки в виде монолитного слоя

В качестве основных материалов для монолитных защитных оболочек монтажных проводов используются полимеры класса полиамидных смол (капрон, нейлон и др.), поливинилхлоридный пластикат и сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом (фторопласт 4М).

Пленка из капрона имеет высокую механическую прочность, небольшой коэффициент трения и малую плотность.

Основные характеристики капрона следующие:

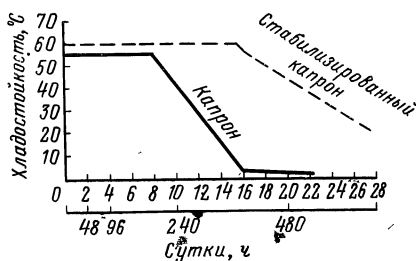
Плотность, $г/см^3$ . . . . .	1,14
Температура плавления, $^{\circ}C$ . . . . .	220
Прочность на разрыв, $кгс/см^2$ . . . . .	500
Прочность на изгиб, $кгс/см^2$ . . . . .	800—900
Прочность на удар, $кгс/см^2$ . . . . .	110—120
Твердость по Бринеллю, $кгс/мм^2$ . . . . .	16,2—18,4
Относительное удлинение при разрыве, %	100—200
Водопоглощение при кипячении в течение 1 ч, % . . . . .	3
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, $ом$ . . . . .	$1,1 \cdot 10^{15}$
Удельное объемное электрическое сопротивление, $ом \cdot см$ . . . . .	$1,4 \cdot 10^{15}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $1 \cdot 10^6$ $гц$ . . . . .	0,02
Диэлектрическая проницаемость . . . . .	4,4
Электрическая прочность, $кв/мм$ . . . . .	19,8

Интервал рабочих температур нестабилизированного капрона лежит в пределах от  $-50$  до  $+80^{\circ}C$ . Поэтому в кабельной технике, как правило, применяется стабилизированный капрон, имеющий те же механические и электрические характеристики, но обладающий значительно большей теплостойкостью. Накопленный к настоящему времени опыт применения капроновой смолы показывает, что ее старение является результатом цепных реакций окисления, которые усиливаются при воздействии тепла, света, ионизирующей радиации и других инициаторов. Предотвращение или замедление окислитель-

ных процессов возможно путем введения в капроновую смолу небольших количеств стабилизирующих веществ—ингибиторов-стабилизаторов.

Весьма удачные результаты получены при стабилизации капроновой смолы 0,5%<sup>1</sup> дибетанафтилпарафенилендиамина (ДНФДА). Критерием нагревостойкости прово-

Рис. 12-1. Зависимость хладостойкости проводов с оболочками из стабилизированного и нестабилизированного капрона от времени облучения под лампой ПРК-2.



дов с полиэтиленовой изоляцией и оболочками из стабилизированного и нестабилизированного капрона выбрана потеря ими хладостойкости в процессе теплового старения при повышенных температурах.

Изменение хладостойкости тех же проводов при облучении их лампой ПРК-2, имитирующей условия воздействия солнечной радиации, показано на рис. 12-1.

Однако стабилизация капроновой смолы органическим стабилизатором ДНФДА приводит к нежелательному эффекту. Оболочка из такой смолы меняет со временем свой цвет: из бесцветной она становится непрозрачной неопределенного темного цвета, что затрудняет

монтаж проводов из-за обесцвечивания отличительного кодирования, полученного путем применения цветных композиций полиэтилена. Поэтому в последнее время стабилизация капроновой смолы производится с помощью

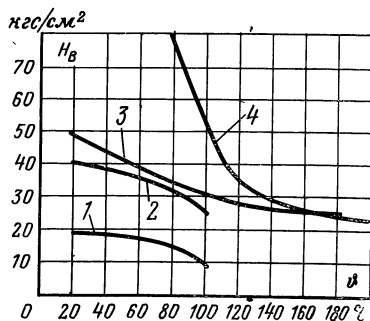


Рис. 12-2. Твердость различных материалов в зависимости от температуры.

1 — поливинилхлоридный пластикат (рецептура 230); 2 — фторопласт 4; 3 — полиэтилен высокой плотности; 4 — стабилизированный капрон.

неорганического стабилизатора — стабилита-10, представляющего собой сложное соединение на основе меди с добавкой йодистого калия. По своим стабилизирующим свойствам стабилит-10 не уступает ДНФДА, но не меняет прозрачности капроновой пленки, что позволяет легко различать цвет изоляции.

Капрон по сравнению с другими материалами, применяемыми в кабельной технике, обладает повышенной твердостью. Это хорошо видно из рис. 12-2. Поэтому применение капрона в качестве материала защитной оболочки монтажных проводов стало возможным только благодаря исключительно малым толщинам таких оболочек, не снижающих существенно гибкость проводов в целом. При существующем уровне технологии стабильная минимальная толщина капроновой оболочки может быть 50—75 мкм. Рекомендуемые толщины капроновых оболочек в зависимости от размеров проводов приведены ниже.

Диаметр провода под оболочкой, мм . . . . .	До 1,5	От 1,51 до 3,0	Свыше 3,0
Толщина капроновой оболочки, мм . . . . .	0,075	0,100	0,150

Капроновая оболочка обычно накладывается на монтажные провода с изоляцией из поливинилхлоридного пластика (провода типа ВК) и полиэтилена высокой и низкой плотности (ПК и ППК). В отдельных случаях для экранированных проводов с изоляцией из поливинилхлоридного пластика применяются защитные оболочки из шланговых рецептур этого пластика (провода типа ВЭВ). Такие оболочки обладают повышенной гибкостью, негорючестью, стойкостью к агрессивным средам и рядом других полезных свойств. Однако эти оболочки могут быть наложены с толщиной не менее 0,2—0,3 мм, что существенно увеличивает габариты и массы проводов.

Для проводов повышенной нагревостойкости в последнее время стали применяться монолитные оболочки из фторопласта 4М. Высокая технологичность этого материала дает возможность получать оболочки толщиной 0,1—0,15 мм, что практически мало снижает гибкость даже проводов с изоляцией из кремнийорганической резины.

### 12-3. Защитные оболочки в виде пропитанных оплеток

Наряду с монолитными защитными оболочками в современных монтажных проводах применяются и защитные покровы в виде оплетки из стекловолокна и различных синтетических нитей, пропитанных теплостойкими лаками.

Существенными преимуществами защитных покрытий этого типа являются их высокая гибкость, практически не снижающая гибкости проводов, весьма малые габариты, доступность и низкая стоимость стекловолокна и некоторых синтетических нитей. Вместе с тем защитные покрытия в виде пропитанных оплеток обладают целым рядом серьезных недостатков, важнейшим из которых является весьма высокая трудоемкость изготовления, включающая две такие непроизводительные операции, как оплетка и лакировка. До недавнего времени основным материалом для оплетки проводов как нормальной, так и повышенной нагревостойкости являлось стекловолокно. В первом случае применение стеклооплетки значительно улучшало стойкость проводов к продавливанию при максимальных рабочих температурах, во втором — повышало стойкость их к разовым перегревам. Таким образом, указанное защитное покрытие являлось универсальным для проводов всех классов нагревостойкости. Для оплетки применяются нити из бесщелочного стекловолокна с метрическим номером 40, что позволяет получать покрытия толщиной 0,14—0,15 мм. Для пропитки стеклооплетки применяются кремнийорганические лаки марок К-55 и К-47 (для проводов с нагревостойкостью до +200 °С) и суспензии фторопласта 4Д (для проводов более высокой нагревостойкости).

Преимуществом защитных покровов в виде пропитанных стеклооплеток является их исключительная стойкость к кратковременным разовым перегревам, пожаростойкость и сравнительно низкая стоимость. Однако такие покрытия обладают рядом весьма существенных недостатков, важнейшими из которых являются:

- крайне низкая стойкость к истиранию;

- низкая технологичность и токсичность процесса тростки и оплетки стекловолокном;

- необходимость выжигания замасливателя из стекловолокна при лакировке стеклооплетки;

отсутствие стекловолокон высоких метрических номеров, что исключает возможность оплетки стекловолокном проводов малых сечений.

Поэтому в последнее время наряду со стекловолокном для оплетки монтажных проводов стали применять и некоторые синтетические нити. Так, для проводов нормальной нагревостойкости используется оплетка из полиэфирных (лавсановых) нитей, пропитанная новым теплостойким лаком на основе полимера фенилона-С, относящегося к классу циклических полиамидов. Для проводов по-

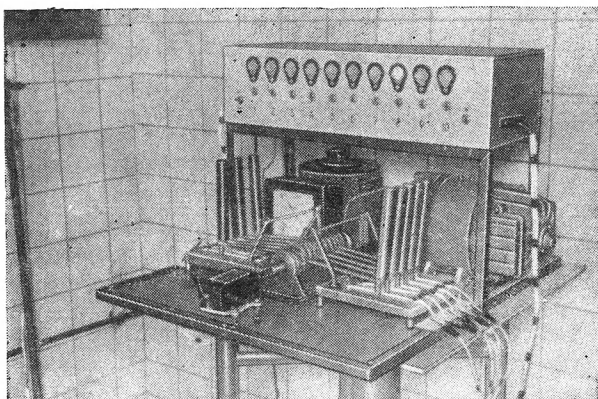


Рис. 12-3. Общий вид установки для испытания монтажных проводов на стойкость к истиранию.

вышенной нагревостойкости могут применяться оплетки из фенилоновых нитей, пропитанных фенилоновым лаком. Такие покрытия обеспечивают достаточную нагревостойкость проводов, а также их негорючесть и высокую стойкость к агрессивным средам. Основным преимуществом указанных покрытий по сравнению с пропитанными стеклооплетками является исключительная стойкость к истиранию. В табл. 12-1 приведены сравнительные данные по стойкости к истиранию проводов сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  с изоляцией из кремнийорганической резины и оболочками в виде оплеток из стекловолокна, лавсановых и фенилоновых нитей. Испытания указанных проводов на стойкость к истиранию проводились на скребковом приборе, изображенном на рис. 12-3. Истирающие

нагрузки создаются боковой поверхностью стальной иглы, перемещающейся вдоль образца. Величина продавливающего груза была выбрана 600 гс.

Т а б л и ц а 12-1

Материал оплетки	Тип лака	Количество двойных ходов иглы до замыкания с жилой
Стекловолокно № 80/2	К-55	50—100
Лавсан № 90	Фенилоновый	5 000—6 000
Фенилоновое волокно № 70	То же	5 000—7 000

Кроме того, оплетки из лавсана и фенилона выполняются из нитей более высоких номеров, чем из стекловолокна, что дает возможность снизить толщину покрытия. Так, пропитанная оплетка из лавсана № 90 дает толщину покрытия всего 0,07—0,08 мм, против 0,14—0,15 мм в случае оплетки из стекловолокна.

#### 12-4. Отличительное кодирование монтажных проводов

Для облегчения монтажа сложных схем радиоэлектронной аппаратуры применяется так называемое отличительное кодирование монтажных проводов. Отличительное кодирование позволяет различать провода, предназначенные для выполнения определенных цепей схемы, без соответствующих измерений (например, прозвонки) и тем самым существенно увеличивает производительность труда при монтаже аппаратуры и проведении различных регламентных работ.

Для большинства монтажных проводов, не имеющих защитных покровов, существуют два вида отличительного кодирования: цветное, производимое с помощью окраски изоляции проводов в различные цвета, и цифровое или буквенное кодирование, заключающееся в нанесении на поверхность проводов различной цифровой или буквенной информации. Цветовое кодирование проводов принципиально может быть осуществлено двумя способами. Окраска проводов достигается или путем введения красителя в материал изоляции, или посредством нанесения цветных полос (чаще всего спиральных) на поверхность изоляции.



Можно считать, что практически все изоляционные материалы, применяемые для изолирования монтажных проводов, допускают пигментирование различными красителями. Количество отличительных расцветок монтажных проводов по этому способу колеблется от 7 до 12 в зависимости от материала изоляции. Условные обозначения цветных монтажных проводов приведены в табл. 12-2.

Т а б л и ц а 12-2

Наименование цвета	Условное обозначение	Наименование цвета	Условное обозначение
Красный или розовый	К	Желтый или оранжевый	Ж
Синий или голубой	С	Белый или натуральный	Б
Черный или фиолетовый	Ч	Зеленый	З

Однако введение красителей в материал изоляции обычно приводит к снижению целого ряда характеристик проводов. Прежде всего это относится к величине электрической прочности и однородности. Снижение электрической прочности проводов и увеличение разброса значений пробивных напряжений происходит за счет увеличения неоднородности изоляционного материала при введении пигментов. При этом существенное значение имеет дисперсность красителей, т. е. величина и стабильность размеров элементарных частиц, из которых состоит тот или иной пигмент. Методика отбора красителей для пигментирования изоляции монтажных проводов описана в гл. 10. Следует также отметить, что пигментирование может увеличивать склонность некоторых изоляционных материалов к растрескиванию и в ряде случаев снижать их влагостойкость. Все это ограничивает номенклатуру красителей, рекомендуемых для пигментирования изоляции монтажных проводов.

Второй способ цветового кодирования, как правило, не имеет указанных выше недостатков. Помимо сохранения электрической прочности и однородности изоляции преимуществом этого способа является также и то, что с его помощью можно получить значительно большее ко-

личество расцветок (путем комбинаций различных спиральных полос). Однако этот способ до сих пор применим только для некоторых типов проводов. Это ограничение связано с отсутствием красящих лаков, имеющих достаточную адгезию, например, к полиэтилену или политетрафторэтилену. Практически окраска цветными полосами в настоящее время решена только для проводов с изоляцией из поливинилхлорида. Наиболее совершенным способом отличительного кодирования монтажных проводов является нанесение на поверхность провода цифровой или буквенной информации. Этот способ имеет следующие преимущества:

1. Буквенное и цифровое кодирование не снижает исходных характеристик провода, так же как и при нанесении спиральных полос.

2. Помимо основного назначения, заключающегося в возможности отличать одинаковые провода при групповом монтаже, такое кодирование позволяет давать целый ряд дополнительной информации, весьма необходимой потребителю. Так, с помощью буквенного и цифрового кодирования можно указывать сечение и марку провода, номер стандарта, завод-изготовитель, дату изготовления и другую полезную информацию.

К сожалению, этот прогрессивный способ кодирования монтажных проводов мало привился в отечественной практике. Цветовое кодирование для проводов, имеющих защитные покровы, решается следующим образом. Для проводов с защитной оболочкой из поливинилхлорида цветовое кодирование возможно путем пигментирования материала оболочки или нанесения на ее поверхность цветных спиральных полос. Для проводов с прозрачными монолитными оболочками из капрона и фторопласта 4М цветовое кодирование получается за счет расцветки изоляции. Кроме того, на оболочку из капрона могут быть нанесены цветные спиральные полосы.

При наличии защитных оболочек в виде пропитанных оплеток цветовое кодирование осуществляется или с помощью цветных пигментированных лаков (эмалей) или цветных волокон (в частности, лавсановых или фенилоновых). В последнем случае, как указывалось выше, возможно любое количество расцветок за счет различных комбинаций заправки оплеточных машин цветными пасмами.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

### **13-1. Общие требования к технологическому процессу изготовления монтажных проводов**

Качественные характеристики монтажных проводов в большой мере зависят от правильности выбора технологических процессов изготовления всех элементов этих проводов.

Монтажные провода являются одним из самых массовых видов кабельной продукции, что в свою очередь предъявляет к технологическому процессу их изготовления требования возможности применения поточного производства и совмещения процессов. При изготовлении монтажных проводов с жилой из одной проволоки совмещение процессов возможно в очень широком масштабе с объединением в одну поточную линию процессов волочения токопроводящей жилы, изолирования и наложения защитных покровов.

При применении в качестве жилы монтажных проводов многопроволочной токопроводящей жилы процесс изготовления монтажных проводов полностью не укладывается в поток, и в этом случае отделяют операции скрутки токопроводящей жилы от операций изолирования и наложения защитных покровов.

### **13-2. Технология скрутки токопроводящих жил**

Основным технологическим оборудованием для скрутки токопроводящих жил являются быстроходные сигарообразные крутильные машины (рис. 13-1). Основная рабочая часть этой машины представляет собой цилиндр сигарообразной формы, внутри которого на шариковых подшипниках установлены люльки для катушек с проволокой. Люльки с расположенными в них катушками не участвуют во вращении корпуса сигары.

Применяемые сигарообразные крутильные машины классифицируются на типы по числу люлек (чаще всего 6 и 12), а также по размерам катушек (обычно  $\varnothing$  100, 150 и 200 мм). В ряде современных сигарообразных крутильных машин для повышения числа оборотов враще-

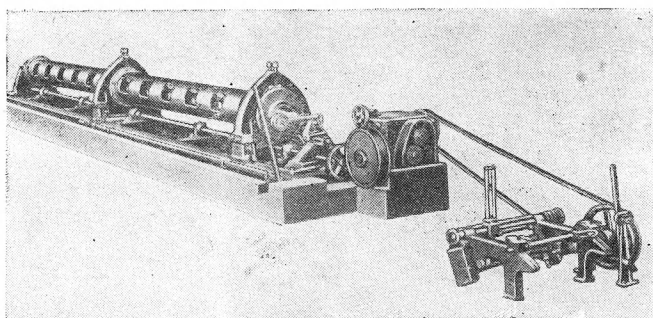


Рис. 13-1. Общий вид сигарообразной крутильной машины, применяемой для скрутки токопроводящих жил.

ние тела сигары осуществляется на воздушной подушке, что позволило значительно увеличить частоту вращения. В связи с малой прочностью участвующих в скрутке проволок сигарообразные крутильные машины имеют автоматы на случай обрыва проволоки, мгновенно останавливающие машину и не дающие концу образовавшейся проволоки уйти к калибру (рис. 13-2).

Благодаря расположению автоматов непосредственно у отдающих катушек при их использовании обеспечивается более быстрая остановка машины, чем при использовании автоматов типа контактного кольца, расположенных на выходном конце машины. В случае обрыва проволоки во время скрутки оборвавшаяся проволока подматывается без нарушения конфигурации жилы и сваривается встык на специальной машине конденсаторной сварки (рис. 13-3). Схема машины приведена на рис. 13-4.

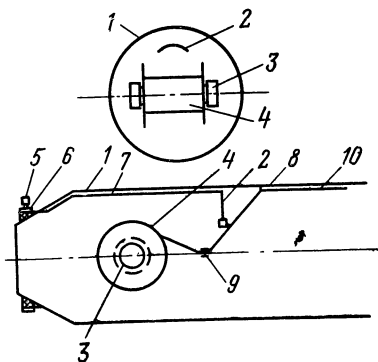


Рис. 13-2. Схема автоматического устройства для остановки машины при обрыве проволоки.

1 — корпус сигары; 2 — контактная медная шина; 3 — люлька; 4 — отдающая катушка; 5 — щетки; 6 — токоподводящее кольцо; 7 — подводка тока от кольца к контактной шине; 8 — направляющая; 9 — полая цапфа люльки; 10 — скручиваемая проволока.



Рис. 13-3. Конденсаторная машина для сварки проволоки.

Принцип работы машины заключается в следующем: переменный ток частотой 50 *гц*, напряжением 220 *в* подается на автотрансформатор *АТР* и от него — на повышающий трансформатор *Тр1*. Со вторичной обмотки по-

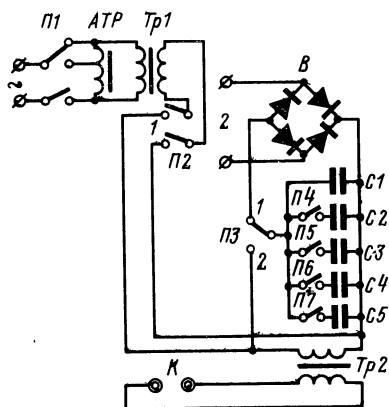


Рис. 13-4. Электрическая схема конденсаторной машины.

вышающего трансформатора напряжение поступает на переключатель *П2*. В положении 2 переключателя напряжение подается на выпрямитель *В*, и при положении 1 переключателя *П3* происходит зарядка конденсаторов *С1—С5* до требуемого напряжения. После зарядки конденсаторов (время зарядки 3—5 *сек*) переключатель *П3* переводится в положение 2 для разряда конденсаторов на сварочный трансформатор

*Тр2.* При этом во вторичной цепи последнего наводится импульс тока, производящий нагрев и сварку проволок, укрепленных в зажимах *K*.

В положении *1* переключателя *П2* переменное напряжение подается на первичную обмотку сварочного трансформатора, что позволяет производить отжиг проволоки до или после сварки в зависимости от технологии.

Машина имеет плавную регулировку напряжения от 0 до 500 *в* и регулировку емкости конденсаторов — от 20 до 120 *мкф* ступенями через 20 *мкф*. Максимальная энергия, накапливаемая в конденсаторах машины, 15 *вт* × *X сек.*

Механическая часть машины состоит из зажимного и подающего механизмов, позволяющих укрепить свариваемые концы проволоки и свести их до соприкосновения при давлении, необходимом для сварки, которое плавно регулируется в пределах от 0 до 100 *гс*. Подвижная часть подающего механизма смонтирована в шариковых направляющих, чем достигается высокая плавность хода.

Для обеспечения полной соосности свариваемых концов проволок и избежания утолщения в месте сварки проволоки вставляются в капиллярную стеклянную трубку длиной 5 *мм*. Внутренний диаметр трубки должен быть больше диаметра свариваемой проволоки на 0,02—0,04 *мм*. Расстояние между токопроводящими зажимами равно длине стеклянной трубки плюс 1 *мм*, что необходимо для плотного стыкования и осадки проволоки в процессе сварки. После сварки стеклянная трубка разбивается.

Параметры режима сварки подбираются опытным путем для каждого отдельного вида свариваемой проволоки. Испытания образцов медных проволок, сваренных на конденсаторной машине, показали, что место сварки проволок равнопрочно с основным металлом. Увеличение омического сопротивления в месте сварки лежит в допустимых пределах.

Машины шнуровой скрутки отличаются от других крутильных машин тем, что отдающие катушки с проволокой, участвующей в скрутке, расположены вне машины, а калибр, тяговое устройство и приемный барабан, на которые принимаются скрученные жилы, расположены внутри машины. Кроме того, эти машины отличаются от сигарообразных крутильных машин тем,

что в сигарообразных крутильных машинах большое количество проволок набирается в жилу несколькими повивами, причем каждый повив накладывается за отдельный проход через сигару. Это позволяет чередовать в случае нужды направление скрутки повивов (правое и левое). В шнуровой скрутке полное количество проволок жилы скручивается пучком одновременно в одном направлении. Так как за один оборот рабочей части машины шнуровой скрутки жила скручивается дважды (два шага за один оборот), то при одинаковом числе оборотов крутильной машины производительность машины шнуровой скрутки в 2 раза выше, чем производительность сигарообразной крутильной машины.

Для более правильного расположения проволок в жиле, что имеет большое значение, калибры машины шнуровой скрутки снабжаются распределительными устройством (розеткой) для проволок, отверстия которых соответствуют расположению проволок в жиле при геометрически правильной скрутке.

### **13-3. Технология изолирования**

Технология изолирования монтажных проводов включает следующие технологические процессы: изолирование на червячных и плунжерных прессах и изолирование лентами методом обмотки.

Правильно организованный технологический процесс изолирования монтажных проводов должен обеспечивать максимальное приближение электрических и физико-механических характеристик проводов к характеристикам исходных изоляционных материалов.

#### **а) Технология изолирования на червячных машинах**

Технология изолирования проводов на червячных машинах основывается на способности пластмасс и резин приобретать пластические свойства и легко формоваться под давлением, приобретая заданные геометрические размеры. Это формование осуществляется в специальной матрице с цилиндрическим отверстием заданного размера, причем токопроводящая жила направляется в центр матрицы через соосный с ней дорн (рис. 13-5).

Изолирование монтажных проводов производится на специальных агрегатах (рис. 13-6). Агрегат состоит из

отдающего устройства 1, компенсатора 2, обеспечивающего равномерность натяжения жилы и отсутствия рывков жилы в процессе изолирования; специального устройства для предварительного подогрева жилы 3; червячной машины 4; охлаждающей ванны 5; датчика для контроля диаметра 6; счетчика метража 7; аппарата, контролирующего электрическую прочность изоляции 8; тягового устройства 9, обеспечивающего постоянство скорости изолирования; приемного устройства непрерывного действия 10 с компенсатором. Кроме того, агрегат снабжен пультом управления 11, на котором сконцентрированы все приборы контроля и регулирования процесса изолирования, регулирования диаметра изолируемого провода, степени концентричности изоляции, температуры подогрева жилы всех зон пресса и охлаждающей ванны и пр.

В зависимости от типов изолируемых проводов и применяемых изоляционных материалов в агрегате могут применяться различные червячные машины, различные ванны, отдающие и приемные устройства. Агрегат для изолирования монтажных проводов кремнийорганическими резинами отличается от описанного выше наличием вулканизационной камеры, в которой происходит вулканизация резины.

Основным рабочим органом, определяющим область применения агрегата, является червячная машина.

Червячные машины классифицируются по диаметрам червяка. Для монтажных проводов применяются червячные машины с различными диаметрами червяков, размеры и область применения которых указаны ниже.

Диаметр червяка, мм	Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>
18—25	0,03; 0,05
25—45	От 0,08 до 0,2
32—63	От 0,35 до 0,75
45—90	От 0,75 до 2,5

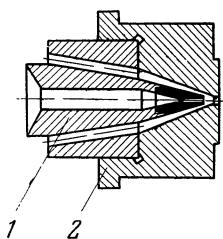


Рис. 13-5. Типовой прессовый инструмент, используемый на червячных машинах для наложения изоляции из пластмасс и резины.

1 — дорн; 2 — матрица.

Одной из основных характеристик червячной машины является отношение рабочей длины червяка к его диа-



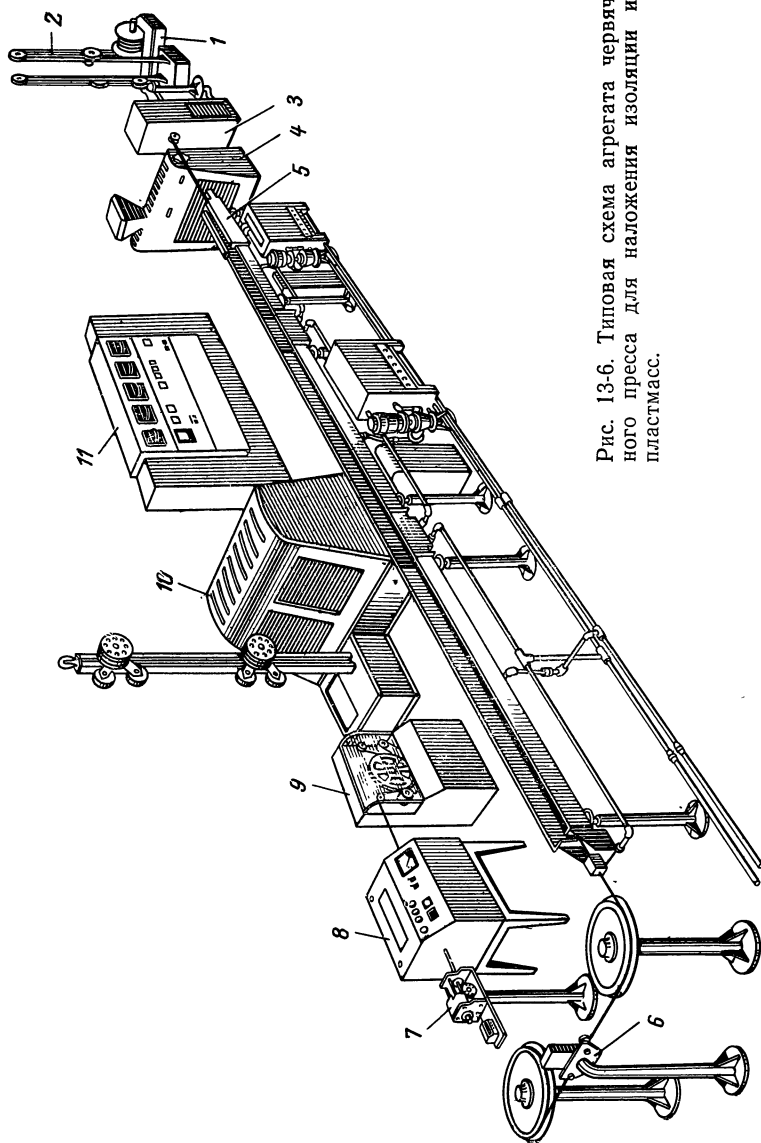


Рис. 13-6. Типовая схема агрегата червячного пресса для наложения изоляции из пластмасс.

метру, которое выбирается в зависимости от качественных характеристик применяемых материалов. В современных червячных машинах приняты следующие отношения длины червяка к его диаметру:

Наименование материалов	Принятое отношение
Поливинилхлоридные пластикаты нормальной пластичности	15—20
Жесткие поливинилхлоридные пластикаты . . . . .	25
Полиэтилен низкой и высокой плотности и сополимеры полиэтилена . . . . .	15—25
Сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом, а также другие фторсодержащие сополимеры . . . . .	15—25
Силиконовые резины . . . . .	7—10

Устройство червячных машин и технологические процессы изолирования главным образом зависят от агрегатного состояния изолирующего материала. Изолирование может осуществляться материалами, находящимися в твердом агрегатном состоянии за счет пластических свойств материала при нагреве и может осуществляться материалами, которые в процессе разогрева переходят в жидкое агрегатное состояние (вязкие жидкости).

Резина и поливинилхлоридные пластикаты относятся к первой группе материалов, у которых с нагревом увеличивается пластичность, но перехода в жидкое агрегатное состояние не происходит.

Полиэтилены и фторсодержащие сополимеры относятся ко второй группе материалов, прессование которых ведется в состоянии вязких жидкостей, при этом давление в червячной машине подчиняется закону Паскаля. Этим по существу определяется форма и технологическое использование червяка, цилиндра, головки и прессующего инструмента, а также выбор температурных режимов прессования и методов разогрева материалов. Температурные режимы прессования, помимо изложенного, часто ограничиваются температурными свойствами собственно материала.

Материалы, температура разложения которых близка к технологической температуре прессования, требуют очень точной регулировки температуры во всех зонах и имеют очень жесткий технологический температурный интервал.

Методы разогрева материалов при изолировании могут быть различными. Большинство материалов нагре-

ваются до заданной температуры только за счёт нагрева непосредственно в червячной машине. В этом случае при транспортировке червяком материал, продвигаясь к головке, приобретает нужную температуру как за счет теплопередачи от нагретого цилиндра, так и за счет выделения внутреннего тепла от трения. Эти условия нагрева предопределяют конструкцию червяка для различных материалов.

При конструировании червяков помимо температурных характеристик большое значение имеет обеспечение максимального уплотнения материала при входе в головку и возможно полного устранения воздушных включений в толще материала, а также максимального снижения величины обратных потоков материала из головки в цилиндр.

Для максимального уплотнения материала за время прохождения вдоль червяка последние изготавливаются с постепенно уменьшающимся объемом витка, что достигается постепенным снижением как глубины, так и шага нарезки. Соотношение объема витка в загрузочной части червяка к объему витка выходной части называется компрессией, величина которой выбирается различной при переработке различных материалов. Необходимая величина компрессии определяется типом материала, а также формой и размерами его гранул. Величина компрессии должна быть несколько выше, чем отношение плотности материала к его кажущейся плотности (насыпному весу) при данных форме и размере. Величина компрессии, а также величина обратных потоков в большей мере зависят от зазора между червяком и цилиндром. Чем больше зазор, тем больше величина обратных потоков материала и меньше компрессия. Обратные потоки нарушают равномерность давления в головке червячной машины и, как следствие этого, однородность изоляционного слоя. Для современных червячных машин зазоры между червяком и цилиндром устанавливаются около 0,03—0,05 мм.

Правильный выбор формы червяка, зазоров и температурных режимов определяет качество изолирования и производительность червячных машин.

Как уже было сказано выше, изолирование полиэтиленом осуществляется при нагреве его до такого состояния, что он по всем своим характеристикам приближается к вязким жидкостям.

Для повышения однородности массы, попадающей в зону прессования, между головкой и цилиндром устанавливается система сеток, которая, кроме того, осуществляет фильтрацию полиэтилена и задерживает посторонние включения.

Для изолирования монтажных проводов матрица изготавливается с углом истечения  $40-50^\circ$ . Для достижения больших скоростей прессования угол истечения матрицы двойной и имеет переход от  $45-30$  до  $12-5^\circ$ . Длина цилиндрической части матрицы мала и в зависимости от диаметра изолируемых проводов составляет  $1-3$  мм. Диаметр формирующего отверстия в матрице при изолировании полиэтиленом либо устанавливается точно по размеру изолируемого провода, либо имеет размер несколько больше размера номинального диаметра провода по изоляции. Во втором случае желательно образовавшуюся трубочку осаживать на токопроводящую жилу вакуумом.

При изолировании полиэтиленом не допускается вытяжка изоляции провода даже при незначительном остывании.

Температурные режимы изолирования монтажных проводов полиэтиленом высокого и низкого давления ( $^\circ\text{C}$ ) следующие:

Зона загрузки . . . . .	40—60
Первая зона цилиндра . . . . .	180—215
Вторая зона цилиндра . . . . .	190—260
Третья зона цилиндра . . . . .	200—270
Зона шейки . . . . .	210—270 (в некоторых червячных машинах отсутствует)
Зона головки . . . . .	220—280
Зона матрицы . . . . .	230—300

В связи с тем что при охлаждении полиэтилен кристаллизуется, для обеспечения нормальной кристаллизации охлаждение изоляции осуществляется в трехкамерных ваннах с постепенным снижением температуры,  $^\circ\text{C}$ :

Первая зона ванны . . . . .	75—85
Вторая зона ванны . . . . .	45—55
Третья зона ванны . . . . .	Водопроводная вода

Для полиэтилена высокой плотности некоторые фирмы рекомендуют отдалить ванны от червячной машины на  $1,5-2$  м, с тем чтобы первая зона охлаждения была

воздушная, а потом охлаждение в ваннах при указанных выше температурных режимах.

Для изолирования полиэтиленом червячные машины снабжены червяком специальной формы (рис. 13-7). Как видно из чертежа, этот червяк имеет три зоны. Первая зона *а*, зона питания, в которой идет транспортировка гранул полиэтилена и подогрев. Эта зона имеет постоянный шаг и постоянную глубину нарезки. По длине она составляет примерно  $\frac{2}{3}$  общей длины червяка. Вторая зона *б*, зона сжатия, в которой осуществляется постепенное уменьшение глубины нарезки от глубины зоны пи-

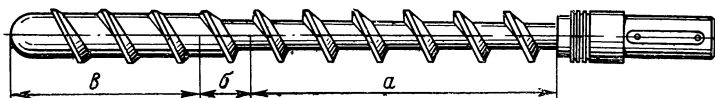


Рис. 13-7. Конструкция червяка для полиэтилена.

тания к глубине зоны выдавливания, обеспечивает требующуюся компрессию для полиэтилена, примерно равную трем. Эта зона имеет длину, равную одному шагу нарезки. Третья зона *в*, зона выдавливания, также имеет постоянный шаг и глубину нарезки, соответственно меньшую на величину компрессии, чем в зоне питания. Длина этой зоны равна примерно  $\frac{1}{3}$  части общей длины червяка.

Головка червячной машины малогабаритная, не имеющая мертвых пространств, с малым объемом полиэтилена, что исключает подгорание во время изолирования (рис. 13-8).

Головка является сборной конструкцией и состоит из корпуса, втулки, дорна, матрицы, обогревателя и термопары. На хвостовую часть втулки навинчивается устройство для создания вакуума в головке. Головка откидного типа присоединяется к цилиндру с помощью хомутовых зажимов и имеет возможность отводиться в сторону благодаря шарниру, соединяющему корпус головки с корпусом червячной машины. Корпус головки изготовлен из нержавеющей или легированной стали.

Части деталей в головке, соприкасающиеся с массой, тщательно отполированы, так как полированная поверхность в сочетании с соответствующей температурой для перерабатывания материала является необходимым

условием для получения качественной поверхности проводов. Обогрев головки — нихромовая спираль, работающая на низком напряжении.

Изолирование поливинилхлоридными пластикатами несколько отличается от изолирования полиэтиленами. Это объясняется тем, что эти пластикаты при разогреве

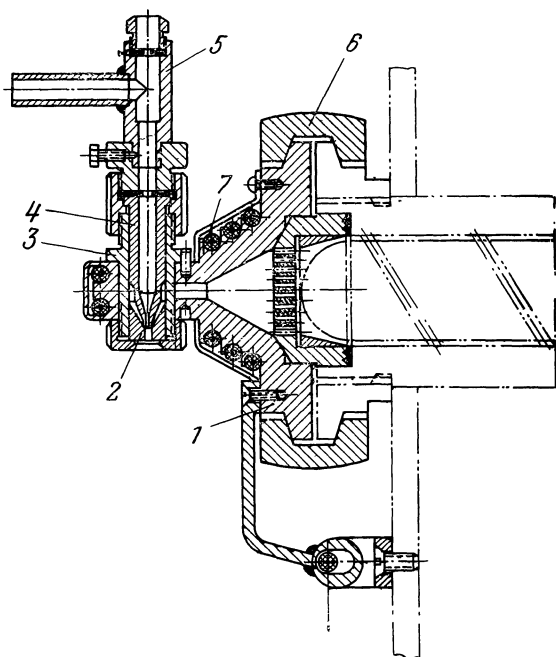


Рис. 13-8. Малогабаритная головка червячной машины.

1 — корпус; 2 — матрица; 3 — втулка; 4 — дорн; 5 — устройство для вакуумирования; 6 — хомут; 7 — электрообогреватель.

не переходят в состояние вязкой жидкости и прессование происходит материалом, находящимся в пластическом состоянии аналогично резине.

Однако переход в пластическое состояние у поливинилхлоридных пластикатов наступает при больших, чем у резин, температурах, поэтому длина червяка для этих пластикатов достаточно велика и равна 15—20 диаметрам. Для жестких пластикатов эта длина увеличивается еще более и достигает 25 диаметров.

По этой же причине применение жестко центрированного инструмента (дорна и матрицы) требует предварительного перераспределения давления пластичного материала в головке червячной машины для исключения отклонения жилы от центрального положения. С этой целью поток массы, выходящий из цилиндра, направляется рассекателем в специальные канавки, выфрезерованные в верхней и нижней частях дорнодержателя. Рассекатель делит массу на два равномерных потока. Верхняя и нижняя канавки имеют совершенно равные объемы и давление массы в прессующей зоне направляется по движению жилы равномерно с верху и с низу жилы, не



Рис. 13-9. Конструкция червяка для поливинилхлоридного пластика.

отклоняя жилу от центрального положения. Особенности инструмента по сравнению с инструментом для полиэтилена в том, что не предусматривается вытяжка материала и отверстия матрицы точно соответствуют диаметру провода.

Червяк для поливинилхлоридного пластика несколько отличается от червяка для полиэтилена (рис. 13-9). Он имеет две зоны. Первая, объединенная зона питания и сжатия, составляет примерно  $\frac{2}{3}$  общей длины червяка. В этой зоне шаг нарезки постоянный, а постоянно убывающая на этой длине глубина нарезки обеспечивает необходимую величину компрессии для переработки пластика (2—2,5).

Вторая зона, зона выдавливания, имеет постоянный шаг и постоянную глубину нарезки.

Температурные режимы прессования поливинилхлоридного пластика для различных рецептур различны (°C) и примерно следующие:

Первая зона цилиндра . . . . .	100—130
Вторая зона цилиндра . . . . .	120—150
Третья зона цилиндра . . . . .	140—170
Шейка . . . . .	150—180
Головка . . . . .	160—200
Матрица . . . . .	180—200

Режим охлаждения не требует тех предосторожностей, которых требует полиэтилен, и охлаждение осуществляется в водопроводной воде.

Прессование сополимеров фторопласта типа 4М или 40Ш в основном подчиняется тем же закономерностям, что и прессование полиэтиленом. Червяк, головка, пресующий инструмент имеют те же формы и в основном те же размеры, что и для изолирования монтажных проводов полиэтиленом.

Отдельные особенности изолирования монтажных проводов заключаются в том, что прессование этими материалами происходит при таких температурах, при которых активность фторсодержащих летучих в достаточной мере велика и воздействие их на сталь сказывается довольно сильно, поэтому червяк, цилиндр, головка, дорн и матрица должны изготавливаться из сплавов, не разрушающихся фторсодержащими продуктами. Такими сплавами являются никелевые сплавы. Температурные режимы прессования фторсодержащими пластмассами значительно выше температурных режимов прессования полиэтиленом и поливинилхлоридными пластикатами и составляют, °С:

Первая зона цилиндра . . . . .	260—280
Вторая зона цилиндра . . . . .	270—290
Третья зона цилиндра . . . . .	280—300
Шейка . . . . .	280—310
Головка . . . . .	290—330
Матрица . . . . .	350—390

Для фторопласта 4М характерна высокая вязкость расплава и низкая критическая скорость сдвига, поэтому переработка их осуществляется на значительно меньших числах оборотов червяка, нежели у других пластмасс; кроме того, так как скорость опрессования невелика для приближения скорости прессования к нормальным скоростям, принятым для других полимеров, изолирование осуществляется выпрессованием трубочки с усадкой ее на провод вытяжкой на 100—200%. Охлаждение изолированных проводов воздушное. Изолируемая токопроводящая жила требует предварительного подогрева до несколько больших температур, чем подогрев жилы при изолировании полиэтиленом. Эта температура должна быть близка к температуре массы в головке. Форма червяка аналогична форме червяка, применяемого для изолирования полиэтиленом. Червяк должен обеспечивать компрессию около 4.



## б) Технология изолирования фторопластом 4Д

Изолирование монтажных проводов смазанными пастами из фторопласта 4Д производится на плунжерных прессах. Процесс этот основан на свойстве смазанной пасты полимера (смесь фторопласта 4Д и бензина) формоваться в холодном состоянии при больших давлениях, приобретая заданную форму. Смазка (бензин марки «Калоша») удаляется из изоляции провода в сушильной печи, после чего провод поступает для запечки в печи, где изоляционный слой при температуре около 380 °С сплавляется в монолитную высокопрочную оболочку.

Плунжерный пресс (рис. 13-10) состоит из отдающего устройства 1, основного электродвигателя 2, гидропривода 3, плунжерной головки 4, печи предварительной сушки 5, печи окончательной запечки 6, тягового устройства 7, приемного устройства 8, зоны отсоса выделяющихся газообразных веществ 9 и двигателя возврата плунжера 10.

Плунжерная головка (рис. 13-11) состоит из следующих элементов: направляющего ролика 1, собственно плунжера 2, цилиндра 3, зоны загрузки таблеток из фторопласта 4Д 4, дорнодержателя с дорном 5, накидной гайки 6, матрицы 7.

Прессование фторопласта 4Д осуществляется из предварительно опрессованных таблеток, имеющих форму полого цилиндра. Размеры фторопластовых заготовок зависят от размеров загрузочной камеры плунжерного пресса. Угол истечения в матрице для фторопласта 4Д имеет переход с 60° в начальной зоне до 20° в зоне, переходящей в цилиндрическую часть. Длина цилиндрической части матрицы составляет 8—10 диаметров изолированного провода.

Токопроводящая жила проходит через полую часть цилиндра, через трубку дорнодержателя, заканчивающегося дорном с наконечником, который представляет собой гибкую трубку или иглу. Таблетки или заготовки,

Таблица 13-1

Зона сушки, °С		Зона запечки, °С			
I секция	II секция	I секция	II секция	III секция	IV секция
120—140	160—180	400—420	380—400	350—370	240—265

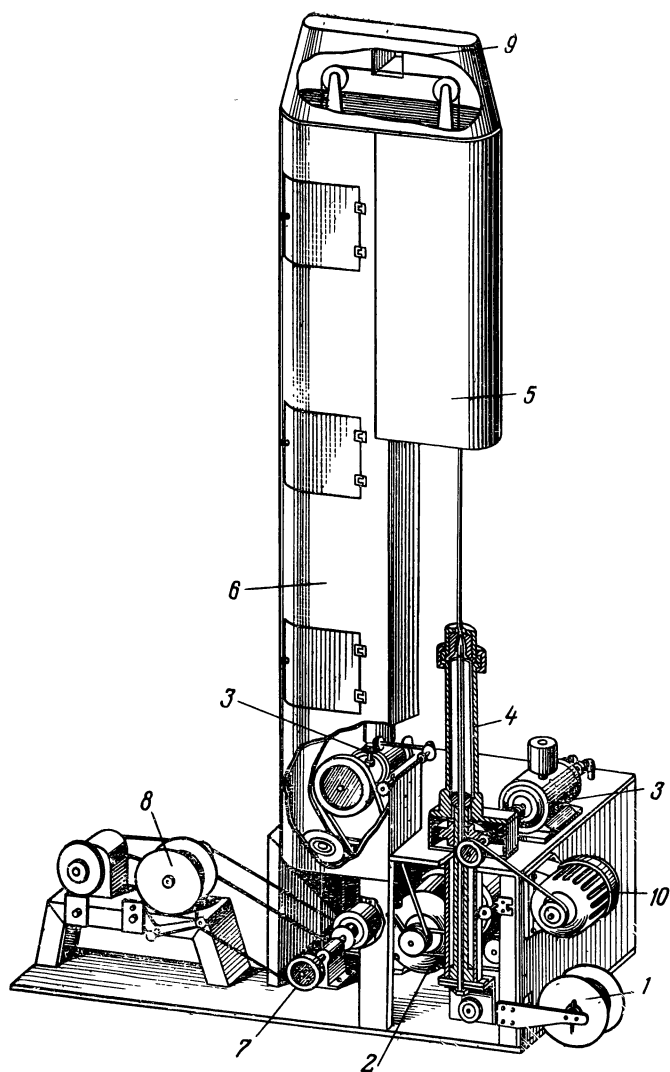


Рис. 13-10. Плунжерный пресс для изолирования проводов фторопластом 4Д.

представляющие собой полые цилиндры, закладываются в камеру плунжерного пресса в таком количестве, которое позволяет выпрессовывать достаточно большие длины провода. Благодаря прямоначальному движению плунжера и изолируемой токопроводящей жилы центрально расположенный дорн, консольно закрепленный на станине плунжерного пресса обеспечивает хорошую центровку изоляции проводов. Расстояние между дорном и цилиндрической частью матрицы для принятого угла истечения  $20^\circ$  обычно выбирается опытным путем.

Температурные режимы печи для предварительной сушки и печи для окончательной запечки приводятся в табл. 13-1.

Скорость опрессования в первую очередь определяется при данных размерах печей скоростью удаления смазки и скоростью спекания провода в монолит.

#### в) Технология изолирования пленочным фторопластом

Большое распространение получили монтажные провода с изоляцией из пленок фторопласта 4. Эти пленки, получаемые методом строжки, предварительно спеченной цилиндрической заготовки с последующим каландрированием, дают возможность методом обмотки получить тонкостенную изоляцию монтажных проводов с достаточно высокими электроизоляционными свойствами. Недостатком такой технологии является способность пленки из фторопласта 4 разматывать-

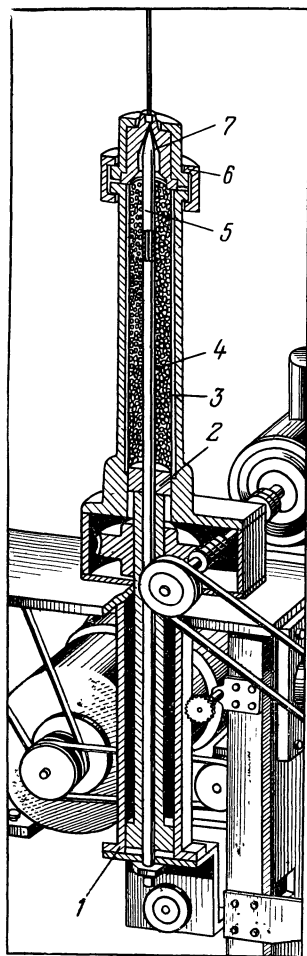


Рис. 13-11. Рабочая часть плунжерного пресса (плунжерная головка).

ся на концах провода. Применение этого вида изоляции не обеспечивает надежной герметичности изоляционного слоя.

Изолирование таких проводов осуществляется на лентообмоточных машинах горизонтального и вертикального типов.

Розетки вертикальной одноходовой трехрозеточной лентообмоточной машины для монтажных проводов (рис. 13-12) центрошпульные с магазином для запаса роликов пленки.

Необходимая толщина изоляции по этой технологии осуществляется набором необходимого количества лент (пленок). Ширина лент, угол обмотки подбираются по обычной кабельной технологии. Термообработка изолированных проводов осуществляется в проходных трубчатых печах.

Для получения проводов с монолитной изоляцией используется каландрованная пленка из фторопласта 4Д. Особенность изолирования этой пленкой заключается в том, что механическая прочность ее значительно меньше, а способность удлиняться за счет растягивающих усилий значительно больше, чем у строганных пленок из фторопласта 4, поэтому машины для обмотки имеют специальное приспособление для регулирования натяжения и обеспечивают весьма малое натяжение, исключающее вытягивание и обрыв пленки. Пленки из фторопласта 4Д при температурах около 380 °С легко спекаются в монолит.

Провода с изоляцией из давленной пленки позволяют получить монтажные провода весьма малых габаритов с монолитной изоляцией.

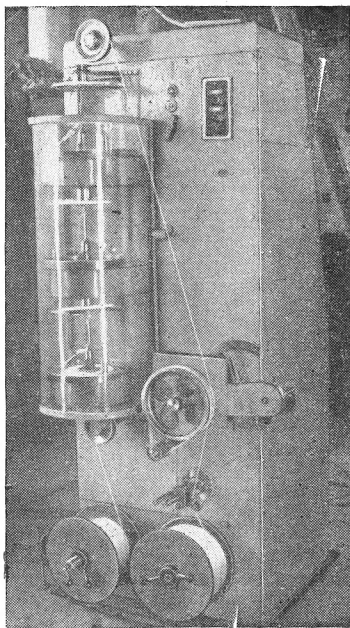


Рис. 13-12. Внешний вид вертикальной одноходовой трехрозеточной изолировочной машины.

Таблица П-1

ПРИЛОЖЕНИЕ

## Номенклатура отечественных монтажных проводов и их основные характеристики

Наименование провода	Марка	Диапазон сечений, мм <sup>2</sup>	Рабочее напряжение, в	Интервал рабочих температур, °С	Сопротивление изоляции, Мом·м			
					в исходном состоянии	при 98% влажности	при максимальной температуре	
Провода монтажные с изоляцией из поливинилхлоридного пластика	В	0,03—2,5	250	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>	
То же экранированные	ВЭ	0,08—2,5	250	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>	
Провода монтажные с изоляцией из поливинилхлоридного пластика и наружной капроновой оболочкой	ВК	0,03—2,5	250	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>	
То же экранированные	ВКЭ	0,08—2,5	250	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>	
То же экранированные с наружной оболочкой из поливинилхлоридного пластика	ВКЭВ	0,08—2,5	250	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>	
Провода монтажные гибкие с комбинированной изоляцией из волокна и поливинилхлоридного пластика	МГШВ	0,12—1,5	380	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>	

Продолжение таб.л. П-1

Наименование провода	Марка	Диапазон сечений, мм <sup>2</sup>	Рабочее напряжение, в	Интервал рабочих температур, °С	Сопротивление изоляции, Мом·м		
					в исходном состоянии	при 98% влажности	при максимальной температуре
Провода монтажные гибкие с комбинированной изоляцией из волокна и поливинилхлоридного пластика экранированные	МГШВЭ	0,12—1,5	380	—50÷+70	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>2</sup>
Провода монтажные с изоляцией из полиэтилена высокой плотности	МПМ П	0,12—1,5 0,03—0,08	250	—50÷+80	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>
То же экранированные	МПМЭ ПЭ	0,12—2,5 0,08—0,12	250	—50÷+80	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>
Провода монтажные с изоляцией из полиэтилена высокой плотности и наружной капроновой оболочкой	МПКМ ПК	0,12—2,5 0,02—0,12	250	—50÷+80	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>
То же экранированные	МПКМЭ ПКЭ	0,12—2,5 0,08—0,12	250	—50÷+80	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>
Провода монтажные с изоляцией из фторопласта 40Ш, теплостойкие	ГФ-40-250 ГФ-40-500	0,12—2,5 0,12—2,5	250 500	—60÷+200	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>

Наименование провода	Марка	Диапазон сечений, мм <sup>2</sup>	Рабочее напряжение, в	Интервал рабочих температур, °С	Сопротивление изоляции, Мом·м		
					в исходном состоянии	при 98% влажности	при максимальной температуре
Провода монтажные теплостойкие с изоляцией из фторопласта 4	Ф ГФ	0,12—2,5	500	—60 ÷ +250	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>3</sup>
То же экранированные	ФЭ ГФЭ	0,12—2,5	500	—60 ÷ +250	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>3</sup>
Провода монтажные теплостойкие с изоляцией из фторопласта 4Д	ФД-100 ФД-250 ФД-500	0,02—0,5 0,03—2,5 0,03—2,5	100 250 500	—60 ÷ +200	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>
То же экранированные	ФДЭ-100 ФДЭ-250 ФДЭ-500	0,08—0,5 0,08—2,5 0,08—2,5	100 250 500	—60 ÷ +200	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>
То же экранированные с оболочкой из фторопласта 4Д	ФДЭФ-100 ФДЭФ-250 ФДЭФ-500	0,08—0,5 0,08—2,5 0,08—2,5	100 250 500	—60 ÷ +200	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>
Провода монтажные теплостойкие с комбинированной стеклофторопластовой изоляцией	СФ	0,20—2,5	380	—60 ÷ +250	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>

Продолжение таб.л. П-1

Наименование провода	Марка	Диапазон сечений, мм <sup>2</sup>	Рабочее напряжение, в	Интервал рабочих температур, °С	Сопротивление изоляции, Мом·м		
					в исходном состоянии	при 98% влажности	при максимальной температуре
Провода монтажные теплостойкие с комбинированной стеклофторопластовой изоляцией экранированные	СФЭ	0,20—2,5	380	—60÷+250	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>
Провода монтажные теплостойкие с изоляцией из фторопласта 4М	ФМ-100	0,03—2,5	100	—60÷+200	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>
Провода монтажные теплостойкие особо гибкие с изоляцией из кремнийорганической резины	КР	0,12—2,5	100	—60÷+200	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>
То же с оболочкой в виде лакированной оплетки из теплостойких волокон	КРФ	0,12—2,5	250	—60÷+200	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>
То же экранированные	КРФЭ	0,12—2,5	250	—60÷+200	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>

Примечание. Токопроводящие жилы монтажных проводов сечением 0,02—0,35 мм<sup>2</sup> могут быть как в нормальном, так и в усиленном (высокопрочном) исполнении.



Монтажные провода с изоляцией из поливинилхлоридного пластика

Сечение, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм						Расчетная масса, кг/км							
	В	ВЭ	ВК	ВКЭ	ВКЭВ	МГШВ	МГШВЭ	В	ВЭ	ВК	ВКЭ	ВКЭВ	МГШВ	МГШВЭ
0,03	0,85	—	1,05	—	—	—	—	10,4	—	1,3	—	—	—	—
0,05	0,90	—	1,12	—	—	—	—	11,2	—	1,6	—	—	—	—
0,08	0,95	1,45	1,20	1,65	2,25	1,30	—	1,5	5,3	1,9	—	—	—	—
0,12	1,05	1,55	1,30	1,75	2,35	1,60	—	2,0	5,9	2,4	6,3	8,4	2,5	—
0,20	1,20	1,70	1,40	1,90	2,50	1,90	—	3,1	7,1	3,5	7,6	10,0	4,3	—
0,35	1,40	1,85	1,60	2,05	2,65	2,20	2,50	4,8	9,1	5,2	9,7	12,1	6,2	12,0
0,5	1,50	2,00	1,70	2,20	2,80	2,50	3,30	6,0	10,4	6,5	11,1	13,7	8,0	15,0
0,75	1,75	2,25	2,00	2,45	3,10	2,80	—	9,1	14,9	3,7	15,6	18,5	11,5	22,0
1,0	2,00	2,50	2,20	2,65	3,35	3,00	—	11,8	18,1	12,4	19,0	22,8	25,2	—
1,5	2,30	2,80	2,50	2,95	3,65	—	—	17,1	24,9	17,6	25,7	29,9	20,0	—
2,5	2,80	3,30	3,0	3,45	4,20	—	—	28,2	37,3	29,2	38,6	43,6	—	—

Таблица П-3

Монтажные провода с изоляцией из полиэтилена высокой плотности

Сече- ние, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм						Расчетная масса, кг/км									
	МПМ	П	МПМЭ	ПЭ	МПКМ	ПК	МПКМЭ	ПКЭ	МПМ	П	МПМЭ	ПЭ	МПКМ	ПК	МПКМЭ	ПКЭ
0,03	—	0,74	—	—	—	0,94	—	—	—	0,7	—	—	—	0,9	—	—
0,05	—	0,80	—	—	—	1,00	—	—	—	0,9	—	—	—	1,2	—	—
0,08	—	0,86	—	1,26	—	1,06	—	1,46	—	1,2	—	—	—	1,5	—	4,3
0,12	1,00	—	1,50	—	1,20	—	1,70	—	1,8	—	5,8	—	—	—	6,2	—
0,20	1,15	—	2,70	—	1,35	—	1,90	—	2,8	—	7,0	—	—	—	7,4	—
0,35	1,40	—	1,90	—	1,60	—	2,10	—	4,5	—	9,1	—	—	—	9,6	—
0,5	1,50	—	2,00	—	1,70	—	2,20	—	5,7	—	11,4	—	—	—	11,9	—
0,75	1,90	—	2,40	—	2,10	—	2,60	—	3,1	—	15,1	—	—	—	15,8	—
1,0	2,10	—	2,60	—	2,30	—	2,80	—	11,5	—	18,1	—	—	—	18,9	—
1,5	2,40	—	2,90	—	2,60	—	3,10	—	16,7	—	24,6	—	—	—	25,5	—

Т а б л и ц а П-4

## Монтажные провода с изоляцией из фторопласта 4

Сечение, мм <sup>2</sup>	Наружный диаметр, мм						Расчетная масса, кг/км					
	Ф	ГФ	ФЭ	ГФЭ	СФ	СФЭ	Ф	ГФ	ФЭ	ГФЭ	СФ	СФЭ
0,12	1,00	1,10	1,60	1,70	1,45	—	2,5	2,4	5,2	5,1	—	—
0,20	1,10	1,20	1,70	1,80	1,65	1,98	3,3	3,6	6,0	7,5	4,4	9
0,35	1,40	1,50	2,00	2,10	1,75	2,20	5,4	5,5	9,5	9,7	6,7	12,2
0,5	1,50	1,70	2,10	2,30	1,75	2,30	6,8	7,2	11,1	13,0	8,5	14,0
0,75	1,70	1,90	2,30	2,50	2,10	2,64	9,4	10,6	15,3	16,5	—	19,5
1,0	2,00	2,20	2,60	2,80	2,20	2,75	12,9	13,8	18,9	19,9	—	22,0
1,5	2,30	2,60	2,90	3,20	2,53	3,10	17,7	19,4	23,9	28,9	20,5	28,0
2,5	—	—	—	—	3,10	3,74	—	—	—	—	31	43,5

Т а б л и ц а П-5

## Монтажные провода с изоляцией из фторопласта 4Д

Сечение, мм <sup>2</sup>	Наружный диаметр, мм						Расчетная масса, кг/км					
	ФД-100	ФД-250	ФД-500	ФДЭ-100	ФДЭ-250	ФДЭ-500	ФД-100	ФД-250	ФД-500	ФДЭ-100	ФДЭ-250	ФДЭ-500
0,02	0,54	—	—	—	—	—	0,6	—	—	—	—	—
0,03	0,60	—	—	—	—	—	0,8	—	—	—	—	—
0,06	0,72	0,90	1,18	1,15	1,36	1,40	1,0	1,5	2,2	—	—	—
0,08	0,76	0,96	1,24	1,23	1,45	1,50	1,3	1,7	2,7	3,9	4,5	5,9
0,12	0,81	1,05	1,33	1,38	1,60	1,65	1,9	2,4	3,3	4,4	5,2	6,7
0,20	0,96	1,20	1,48	1,60	1,96	2,00	2,9	3,6	4,6	5,6	6,4	8,6
0,35	1,25	1,38	1,66	1,75	2,26	2,15	5,0	5,3	6,5	8,9	9,4	12,5
0,5	1,37	1,60	1,78	1,87	2,08	2,25	6,2	7,0	7,9	10,5	13,0	14,3
0,75	—	1,85	2,03	—	2,33	2,63	—	10,4	11,4	16,7	18,7	20,1
1,0	—	2,00	2,18	—	2,43	2,78	—	12,7	13,8	19,2	21,6	22,8
1,5	—	2,30	2,48	—	2,78	3,08	—	18,1	19,4	25,9	27,3	30,0
2,5	—	2,80	3,10	—	3,28	3,70	—	29,4	30,9	39,1	40,8	45,8

Т а б л и ц а П-6

## Монтажные провода с изоляцией из сополимеров фторопласта

Сечение, мм <sup>2</sup>	Наружный диаметр, мм не более			Расчетная масса, кг/км		
	ГФ-40-250	ГФ-40-500	ФМ-100	ГФ-40-250	ГФ-40-500	ФМ-100
0,03	—	—	0,65	—	—	0,8
0,05	—	—	0,70	—	—	1,0
0,08	—	—	0,78	—	—	1,3
0,12	1,20	1,40	0,90	2,5	3,2	1,9
0,20	1,35	1,60	1,05	3,7	4,4	3,0
0,35	1,60	1,80	1,30	5,4	6,0	5,1
0,5	1,70	1,90	1,45	6,8	7,7	6,4
0,75	2,10	2,30	1,75	10,6	11,8	9,2
1,0	2,30	2,50	1,95	13,4	14,7	10,0
1,5	2,60	2,80	2,05	18,9	20,4	16,5
2,5	3,25	3,50	3,00	30,8	32,6	25,2

Т а б л и ц а П-7

## Монтажные провода с изоляцией из кремнийорганической резины

Сечение, мм <sup>2</sup>	Наружный диаметр, мм			Расчетная масса, кг/км		
	КР	КРФ	КРФЭ	КР	КРФ	КРФЭ
0,12	1,50	1,80	2,12	3,24	4,1	8,1
0,20	1,60	1,94	2,26	4,32	5,31	9,76
0,35	2,06	2,38	2,70	6,97	8,1	13,35
0,5	2,21	2,53	2,93	8,59	9,68	16,54
0,75	2,42	2,74	3,14	11,79	13,33	20,51
1,0	2,80	3,40	3,8	16,00	18,75	27,28
1,5	3,30	3,90	4,30	21,6	24,5	34,1
2,5	3,80	4,40	4,80	33,2	36,75	47,7

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аглинцев К. А. Дозиметрия ионизирующих излучений. М., Гостехиздат, 1967.
2. Справочник по ядерной физике. Под редакцией Л. А. Арцимовича, М., Физматгиз, 1963.
3. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии. М., «Наука», 1968.
4. Бак М. А., Шиманская Н. С. Нейтронные источники. М., Атомиздат, 1969.
5. Бердичевский Б. Е. Оценка надежности аппаратуры автоматики. М., «Машиностроение», 1966.
6. Бибергаль Л. А., Наги Э. А., Соломоник С. С. Кабели и провода для электронной аппаратуры. М., «Энергия», 1964.
7. Большов Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М., «Наука», 1965.
8. Брагин С. М. Исследование электрической прочности воздушно-стирофлексной изоляции кабеля статистическим методом.— «Электричество», 1959, № 9.
9. Бялобжевский А. В. Радиационная коррозия. М., «Наука», 1967.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.
11. Гольдберг А. Л. и др. Монтажные провода для радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия», 1966.
12. Гольдберг А. Л., Кранихфельд Л. И. Монтажные провода за рубежом. М., ЦИНТИприборэлектропром, 1963.
13. Гольдберг А. Л., Кранихфельд Л. И. К выбору испытательного напряжения низковольтных монтажных проводов.— «Кабельная техника», 1962, № 1.
14. Гольдберг А. Л., Кранихфельд Л. И. К выбору рационального ряда сечений токоведущих жил монтажных проводов.— «Кабельная техника», 1963, № 6.
15. Градштейн И. С., Рыжик Н. М. Таблица интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1963.
16. Гроднев И. И., Миллер Б. Ф. Кабели связи. М., Госэнергоиздат, 1950.
17. Гухман А. А. Физические основы теплопередачи. М., ОНТИ, 1934.
18. Дикерман Д. Н., Кранихфельд Л. И. Эффективность испытаний проводов с тонкостенной изоляцией на АСИ.— «Кабельная техника», 1970, № 70.
19. Дикерман Д. Н., Рывкин Г. А. О расчете стойкости к продавливанию.— «Кабельная техника», 1970, № 69.
20. Дудкевич А. Н. Экспериментальное определение долговечности радиочастотных кабелей.— В кн.: Провода и кабели, М., ОВНИИЭМ, 1967, вып. 2.

21. Дудкевич А. Н. Применение метода усеченной выборки при исследованиях долговечности и нагревостойкости кабельных изделий и электроизоляционных материалов.— «Кабельная техника», 1970, № 69.

22. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.

23. Каден Н. Электромагнитные экраны. М., Госэнергоиздат, 1957.

24. Клейн В. Теория взаимного влияния в линиях связи. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

25. Конобеевский С. Т. Действие облучения на металлы. М., Атомиздат, 1967.

26. Колпачев А. Н. и др. Выбор оптимальных условий эксперимента, обеспечивающих достоверные выводы.— В кн.: Провода и кабели, 1966, Вып. 1.

27. Бавей Ф. Действие ионизирующих излучений на природные и синтетические полимеры. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

28. Сажин Б. Н. Электропроводность полимеров. М., «Химия», 1965.

29. Коломойцев Ф. И., Якунин А. Я. Зависимость добавочной электропроводности и наведенной рентгеновским облучением э. д. с. от толщины диэлектрических образцов.— В кн.: Физика диэлектриков. М., Изд-во АН СССР, 1960.

30. Кранихфельд Л. И. Исследование низковольтных монтажных проводов для радиоэлектронной аппаратуры. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ВЭИ имени В. И. Ленина. М., 1968.

31. Кранихфельд Л. И. Некоторые вопросы определения надежности монтажных проводов.— «Кабельная техника», 1964, № 1.

32. Кранихфельд Л. И., Шпилев А. Н. Новый метод определения гибкости кабелей, предназначенных для подвижной эксплуатации.— «Кабельная техника», 1966, № 39.

33. Кранихфельд Л. И. О достоверности испытаний кабелей и проводов.— «Провода и кабели», 1967, вып. 2.

34. Кранихфельд Л. И. Новое о монтажных проводах.— «Кабельная техника», 1966, № 42.

35. Кранихфельд Л. И. Бортовые авиационные провода. М., Отделение ВНИИЭМ, 1967.

36. Кранихфельд Л. И. и др. Политетрафторэтилен в кабельной промышленности. М., Отделение ВНИИЭМ, 1965.

37. Кранихфельд Л. И., Орлович Т. М., Хазен Л. З. Кремнийорганические резины в кабельной технике. М., Отделение ВНИИЭМ, 1966.

38. Krügel P. Schirmwirkung des Aussenleiter der flexiblen Koaxialkabel.— «Telefunken Zeitung», 1956, Bd 29, S. 114.

39. Махлис Ф. А. Дозиметрия мощных полей гамма-излучения при помощи окрашенного целлофана.— «Приборы и техника эксперимента», 1965, № 1.

40. Михайлов М. И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. М., Связьиздат, 1959.

41. Орлович Т. М., Дудкевич А. Н., Улановская Л. Н. Некоторые общие вопросы испытаний на надежность проводов и кабелей для автоматизированных систем.— В кн.: Провода и кабели, 1967, вып. 1.

42. Половко А. М. Основные теории надежности. М., «Наука», 1964.
43. Ллойд Д. К., Липов М. Надежность. М., «Советское радио», 1964.
44. Привезенцев В. А., Кабыстина Г. Ф. Нагревостойкие монтажные провода.— «Труды НИИКП», 1958, вып. 3.
45. Соловьев Н. Н. Измерительная техника в проводной связи. М., «Связь», ч. I, 1968, ч. II, 1969.
46. Типаж проводов монтажных. М., Госкомитет СМ СССР по автоматизации и машиностроению, ЦБТИ, 1963.
47. Хальд А. Математическая статистика. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
48. Химические реакции полимеров. Под редакцией Е. Феттеса. Перевод с англ. под редакцией З. А. Роговина. М., «Мир», 1967.
49. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
50. Шварцман В. О. Взаимные влияния в кабелях связи. М., «Связь», 1966.
51. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М., «Советское радио», 1964.
52. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М., «Наука», 1964.
53. Weiss G., Allen A., Schwarz H. Peaceful uses of atom. Energy.— «Proc. Intern. Conf.». Geneva, 1955, v. 14, 1956.
54. Dummer G. W. A., Blackband W. T. Wire and R. F. Cables. London, 1961.
55. Foster D. E., Guthrie R. T., Pendergast H. E. Electrical Strength in Teflon TEE Insulation.— «Wire and Wire Products», May 1962.
56. Финкель Э. Э., Сучков В. Ф. Ионизирующие излучения и кабельная техника. М., Отделение ВНИИЭМ, 1966.
57. Финкель Э. Э., Лещенко С. С., Брагинский Р. П. Радиационная химия и кабельная техника. М., Атомиздат, 1968.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

### ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Глава первая. Классификация технических характеристик монтажных проводов и способы их оценки . . . . .	5
1-1. Классификация технических характеристик . . . . .	5
1-2. Виды испытаний . . . . .	7
1-3. Элементы оптимального планирования испытаний . . . . .	10
Глава вторая. Электрические характеристики . . . . .	18
2-1. Испытание высоким напряжением . . . . .	18
а) Выбор величины испытательного напряжения . . . . .	19
б) Возможность многократных испытаний монтажных проводов высоким напряжением . . . . .	26
в) Эквивалентные значения испытательных напряже- ний монтажных проводов на переменном и по- стоянном токах . . . . .	27
г) Эффективность испытаний проводов напряжением на аппаратах сухого испытания . . . . .	29
2-2. Сопротивление изоляции . . . . .	36
2-3. Электрическое сопротивление токопроводящих жил . . . . .	44
2-4. Помехозащищенность . . . . .	45
а) Взаимное влияние цепей . . . . .	46
б) Помехозащищенность при внешних источниках по- мех . . . . .	53
в) Методы измерения помехозащищенности . . . . .	61
Глава третья. Механические характеристики . . . . .	69
3-1. Гибкость . . . . .	69
3-2. Стойкость к перегибам . . . . .	78
3-3. Стойкость к продавливающим нагрузкам . . . . .	82
3-4. Стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам . . . . .	88
3-5. Стойкость к растягивающим нагрузкам . . . . .	91
Глава четвертая. Климатические характеристики . . . . .	92
4-1. Нагревостойкость . . . . .	92
а) Основные определения . . . . .	92
б) Разработка метода испытаний . . . . .	95
4-2. Хладостойкость . . . . .	103
4-3. Стойкость к циклическому воздействию температур . . . . .	107
4-4. Влагостойкость . . . . .	109
Глава пятая. Радиационная стойкость . . . . .	111
5-1. Основные понятия. Единицы измерения . . . . .	112
5-2. Источники ионизирующих излучений . . . . .	113

5-3. Дозиметрия . . . . .	115
5-4. Изменение свойств монтажных проводов, вызванные действием радиации . . . . .	117
<b>Глава шестая. Специальные характеристики . . . . .</b>	<b>122</b>
6-1. Стойкость к агрессивным средам . . . . .	122
6-2. Негорючесть . . . . .	124
6-3. Усадка изоляции . . . . .	128
<b>Глава седьмая. Токовые нагрузки на монтажные про- вода и кабели . . . . .</b>	<b>132</b>
7-1. Тепловое поле провода . . . . .	132
7-2. Тепловое сопротивление провода . . . . .	142
7-3. Расчет длительно допустимых токовых нагрузок на одиночные провода . . . . .	145
7-4. Допустимые токовые нагрузки на одиночные провода в нестационарном режиме. Ампер-секундные характе- ристики провода . . . . .	147
7-5. Длительно допустимые токовые нагрузки на провода, собранные в жгуты . . . . .	153
7-6. Токовые нагрузки в жгутах в нестационарном режи- ме. Ампер-секундные характеристики жгутов и мон- тажных кабелей . . . . .	161
<b>Глава восьмая. Надежность, долговечность и сохране- мость . . . . .</b>	<b>169</b>
8-1. Основные понятия . . . . .	169
8-2. Надежность . . . . .	172
а) Элементы теории надежности . . . . .	172
б) Разработка методов испытаний . . . . .	181
8-3. Сохраняемость . . . . .	188
8-4. Долговечность . . . . .	195

## **ЧАСТЬ ВТОРАЯ**

### **КОНСТРУИРОВАНИЕ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

<b>Глава девятая. Конструирование токопроводящих жил . . . . .</b>	<b>197</b>
9-1. Применяемые материалы . . . . .	197
9-2. Размерный ряд сечений токопроводящих жил . . . . .	200
9-3. Выбор оптимальных конструкций . . . . .	204
а) Общие соображения . . . . .	204
б) Исследование гибкости . . . . .	206
в) Исследование стойкости к многократным перегибам . . . . .	209
г) Исследование усталостной прочности в месте пайки . . . . .	211
д) Рекомендации по выбору оптимальных конструкций токопроводящих жил . . . . .	213
<b>Глава десятая. Конструирование изоляции . . . . .</b>	<b>214</b>
10-1. Применяемые материалы . . . . .	214
а) Классы нагревостойкости изоляционных материалов . . . . .	215
б) Основные характеристики изоляционных материа- лов . . . . .	217
10-2. Понятие об однородности изоляции . . . . .	223
10-3. Практическое применение метода динамической оцен- ки однородности . . . . .	226
а) Оценка степени освоения технологического процесса . . . . .	226
б) Оценка однородности изоляционных материалов . . . . .	229
в) Исследование и выбор оптимальных технологиче- ских режимов процесса изолирования . . . . .	231
	<b>295</b>



10-4. Выбор минимальных толщин изоляции . . . . .	233
10-5. Равностенность изоляции . . . . .	236
10-6. Провода с комбинированной изоляцией . . . . .	241
<b>Глава одиннадцатая. Конструирование экранов монтажных проводов . . . . .</b>	<b>243</b>
11-1. Виды экранов монтажных проводов . . . . .	243
11-2. Оптимальные соотношения конструктивных параметров оплетки . . . . .	246
а) Общие сведения . . . . .	246
б) Зависимость величины сопротивления связи от параметров оплетки . . . . .	248
<b>Глава двенадцатая. Конструирование защитных покровов . . . . .</b>	<b>256</b>
12-1. Назначение защитных покровов . . . . .	256
12-2. Защитные оболочки в виде монолитного слоя . . . . .	258
12-3. Защитные оболочки в виде пропитанных оплеток . . . . .	261
12-4. Отличительное кодирование монтажных проводов . . . . .	263
<b>Глава тринадцатая. Технология изготовления монтажных проводов и применяемое оборудование . . . . .</b>	<b>266</b>
13-1. Общие требования к технологическому процессу изготовления монтажных проводов . . . . .	266
13-2. Технология скрутки токопроводящих жил . . . . .	266
13-3. Технология изолирования . . . . .	270
а) Технология изолирования на червячных машинах . . . . .	270
б) Технология изолирования фторопластом 4Д . . . . .	280
в) Технология изолирования пленочным фторопластом . . . . .	282
<i>Приложение . . . . .</i>	<i>284</i>
<i>Список литературы . . . . .</i>	<i>291</i>

97 коп.